



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (PROFÁGUA/UEMA)

JOÃO YURI DA SILVA CARNEIRO

Mudança de regime hidrológico e degradação da qualidade da
água no rio Itapecuru (MA): evidências de vulnerabilidade
climática e antrópica em sistema estratégico para a gestão de
recursos hídricos

São Luís, MA.

2026

JOÃO YURI DA SILVA CARNEIRO

Mudança de regime hidrológico e degradação da qualidade da água no rio
Itapecuru (MA): evidências de vulnerabilidade climática e antrópica em
sistema estratégico para a gestão de recursos hídricos

Dissertação para qualificação de Mestrado
Profª da Universidade Estadual do Maranhão
como pré-requisito para a obtenção do grau de
Mestre em Gestão e Regulação de Recursos
Hídricos.

Área de Concentração: Regulação e
Governança de Recursos Hídricos

Linha de Pesquisa: Segurança Hídrica e os
Usos Múltiplos da Água

Orientador: Prof. Dr. Marco Valério Jansen Cutrim

São Luís, MA.

2026

JOÃO YURI DA SILVA CARNEIRO

Mudança de regime hidrológico e degradação da qualidade da água no rio
Itapecuru (MA): evidências de vulnerabilidade climática e antrópica em
sistema estratégico para a gestão de recursos hídricos

Aprovada em 12/ maio / 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marco Valério Jansen Cutrim
Profªgua UEMA
(Orientador)

Profa. Dra. Andrea C.G. de Azevedo Cutrim
Profªgua UEMA - Membro Interno

Prof. Dra. Ana Karoline Duarte dos Santos Sá
Secretaria de Educação – Paço do Lumiar – MA – Membro Externo

FICHA CATALOGRÁFICA

Carneiro, João Yuri da Silva.

Mudança de regime hidrológico e degradação da qualidade da água no rio Itapecuru (MA): evidências de vulnerabilidade climática e antrópica em sistema estratégico para a gestão de recursos hídricos / João Yuri da Silva Carneiro. - São Luís - MA, 2026.

72 f.

Dissertação (Mestrado em Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos/Profâgua) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Marco Valerio Jansen Cutrim.

1. Modelo Preditivo. 2. Segurança Hidrica. 3. Salinização Estuarina. 4. Sistema de Alerta preditivo. 5. Variabilidade Hidroclimática. I. Título.

CDU: 556.53(812.1Itapecuru)

Elaborado por Cassia Diniz - CRB 13/910

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Deus, por me proteger e me amar todos os dias, mesmo que eu não seja merecedor. Gostaria de separar um espaço especial para falar da pessoa mais importante da minha vida: Amanda Ribeiro Marinho. Agradeço a Deus por ele ter te colocado no meu caminho, por ele ter me abençoado com algo extraordinário, pois você é muito mais do que eu pedi a ele. Obrigado por tudo que já vivemos juntos, e o que mais me alegra é que estamos apenas no começo da nossa história. Eu te amarei por toda a vida.

Para minha vó, Maria Rita da Silva, deixo minha gratidão por tudo que a senhora fez por mim, me acolhendo, quando tudo parecia perdido, nunca deixando nada faltar para mim, mesmo nos momentos mais extremos que passamos juntos. Em 2020, quase perdi a senhora, mas Deus, o Altíssimo, garantiu que a senhora se mantivesse viva, e que se Ele quiser, por muito tempo.

Nem tudo são Flores, e não posso dizer que minha bisavó, Cândida Silva Pires, não conseguiu me ver nesta nova fase de minha vida. Grande apoiadora de tudo que me propunha a fazer, a senhora ficaria feliz de me ver onde estou agora.

Agradeço as pessoas que me criaram e me tornaram o homem que sou hoje, Claudiana Santos Pereira Filha, Maria Lucia Pires e Maria Rita da Silva. Vocês me mostraram os valores que um homem deveria ter em sua vida, me ensinaram tudo sobre respeito, felicidade e lealdade. Obrigado por terem sido tão relevantes em minha vida.

Aos meus pais, Carlos Eduardo da Silva Carneiro e Vanusa Gonçalves da Silva, agradeço por terem feito o que vocês puderam fazer por mim.

Agradeço fortemente a todos os participantes do Laboratório de Ficologia (Labfic - UFMA), em especial ao Prof. Dr. Marco Valério Jansen Cutrim pelos ensinamentos, compreensão e paciência. O senhor foi parte vital desta dissertação, obrigado pelas orientações dentro e fora do âmbito acadêmico. Não poderia deixar de agradecer imensamente a Dr. Ana Karoline Duarte dos Santos Sá, que me ajudou sempre que eu precisei, e foi uma amiga que fez de tudo para que essa dissertação fosse concluída, nunca serei grato o suficiente a você.

Não poderia deixar de citar as grandes parcerias que fiz neste mestrado: Cláudio Bittencourt, Alan Marques e Antônio Luís, que sempre tiveram lá quando precisei. Obrigado pela força, pelo companheirismo e agradeço demais por tudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP No. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa representativo da área de estudo e localização das estações/pontos de monitoramento.....	18
Figura 2 - Variabilidade interanual do Multivariate ENSO Index (MEI), da pluviosidade anual e da descarga fluvial entre 1992 e 2024.....	26
Figura 3 - Ordenação NMDS dos dados ambientais com base na distância Euclidiana, discriminando as amostras por década (cores) e curso (formas), com separação entre períodos sazonais.....	29
Figura 4 - Diferenças entre alto, médio e baixo curso nas variáveis físico-químicas.....	30
Figura 5 - Diferenças entre décadas (1990s, 2000s, 2010s e 2020s) nas variáveis físico-químicas.....	33
Figura 6 - Variação temporal das variáveis ambientais ao longo das décadas.....	35
Figura 7 - Desempenho do modelo Random Forest.....	37
Figura 8 - Importância das variáveis no modelo Random Forest, comparando as métricas <i>Overall</i> (baseada na permutação) e <i>IncNodePurity</i> (baseada na redução da impureza dos nós)	38
Figura 9 - Interpretação do modelo Random Forest utilizando valores SHAP.....	40
Figura 10 - Cenários prospectivos de risco de salinização no setor inferior do rio Itapecuru entre 2025 e 2045, sob condições de abundância hídrica (La Niña) e seca crítica (El Niño)	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de especificação amostral, fontes regulamentares e governança dos dados hidroambientais na Bacia do Rio Itapecuru (1999–2024).

Tabela 2 - Resultados da análise de variância permutacional (PERMANOVA) avaliando os efeitos de curso, década e sazonalidade sobre a variação dos dados ambientais.....28

Tabela 3 - Resultados da análise de homogeneidade de dispersão multivariada (PERMDISP) para os fatores curso, sazonalidade e década (distância Euclidiana)29

Tabela 4 - Estatísticas descritivas (média $\pm$ desvio padrão) das variáveis de qualidade da água ao longo do curso do rio (alto, médio e baixo curso) e entre décadas (1990–2020)34

Tabela 5 - Resultados dos modelos aditivos generalizados (GAMs) ajustados para avaliar a variação temporal das variáveis ambientais.....36

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
1.1. Mudanças no regime hidrológico em rios tropicais	16
1.2 Salinização e intrusão salina em sistemas flúvio-estuarinos tropicais.....	17
1.3 Degradação da qualidade da água, segurança hídrica e gestão de bacias estratégicas	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Local de estudo	21
3.2 Levantamento e integração de dados.....	22
3.3 Integração climática e caracterização do ENSO	24
3.4 Análises estatísticas	25
3.5 Modelos aditivos generalizados	26
3.6 Modelagem preditiva por Random Forest e interpretação por SHAP	27
4. RESULTADOS.....	30
4.1 Dinâmica Climática e Hidrológica da Bacia do Itapecuru.....	30
4.2 Variação multivariada dos dados ambientais	33
4.3 Variação espacial da qualidade da água da Bacia do Itapecuru	35
4.4 Variação temporal da qualidade da água da Bacia do Itapecuru	37
4.5 Tendências Temporais da Qualidade da Água	40
4.6 Modelagem preditiva (Random Forest).....	42
4.7 Modelo interpretativo (SHAP).....	44
4.8 Cenários prospectivos de risco de salinização	46
5. Discussão.....	48
5.1 Regime hidrológico, variabilidade climática e vulnerabilidade do baixo Itapecuru	48
5.2 Gradiente longitudinal da qualidade da água e intensificação dos sinais de salinização ...	49
5.3 Mudanças temporais da qualidade da água e implicações hidroambientais	50
5.4 Potencial e limitações da modelagem preditiva na avaliação do risco de salinização.....	51
5.5 Implicações para a gestão de recursos hídricos e segurança do abastecimento	53
5.6 Produto técnico como desdobramento aplicado da dissertação	54
5.7 Limitações e perspectivas futuras	55

Agradecimentos.....	56
Referências bibliográficas	57
APÊNDICES.....	59
6. PRODUTO TÉCNICO.....	60
6.1 Objetivo do produto e público-alvo.....	60
6.2 Arquitetura do produto (dados → modelos → regras → comunicação)	60
6.3 Indicadores e limiares (definição metodológica do semáforo)	61
6.4 Procedimento de operação (checklist por nível)	62
6.4.1 Nível Verde (Normalidade).....	62
6.4.2 Nível Amarelo (Atenção).....	62
6.4.3 Nível Vermelho (Crítico)	62
6.5 Validação do produto.....	62
6.6 Plano de implementação.....	63
6.7 Considerações finais do produto	63
APÊNDICE A — Modelo de Boletim Operacional Nível Verde (Normalidade)	64
Indicadores de monitoramento.....	64
□ Recomendações.....	65
APÊNDICE B — Modelo de Boletim Operacional Nível Amarelo (Atenção)	67
Indicadores de monitoramento.....	67
□ Recomendações.....	69
APÊNDICE C — Modelo de Boletim Operacional Nível Vermelho (Crítico).....	70
Indicadores de monitoramento.....	70
□ Recomendações.....	71

Resumo

Este estudo avalia a vulnerabilidade hídrica e ambiental da porção inferior da bacia do rio Itapecuru (MA) frente a mudanças no regime hidrológico e pressões antrópicas, com ênfase na salinização e na degradação da qualidade da água. A partir da integração de séries históricas (1992–2024), análises hidroclimáticas (incluindo MEI/ENSO), monitoramento físico-químico e modelagem (GAM e Random Forest), foram caracterizados gradientes espaço-temporais, tendências e limiares de risco. Observou-se aumento consistente da condutividade elétrica e do pH no baixo curso, maior variabilidade na década de 2010 e associação entre fases ENSO, redução de vazão e intensificação do sinal salino. Os GAMs indicaram tendências temporais significativas para condutividade e pH, enquanto o Random Forest, interpretado por SHAP, destacou a descarga fluvial, turbidez e pH como preditores-chave da condutividade. Dois cenários prospectivos (abundância hídrica vs. seca crítica) ilustram como a combinação entre menor aporte doce e pressões antrópicas eleva o risco de intrusão salina, com implicações diretas para a segurança do abastecimento via Sistema ITALUÍS. Recomenda-se monitoramento contínuo de condutividade e vazão, integração de alertas baseados em limiares hidrológicos e adoção de medidas de gestão adaptativa para proteger a qualidade da água e a operação das captações. A condutividade elétrica, expressa em $\mu\text{S cm}^{-1}$, foi adotada como principal variável hidroquímica indicadora dos processos de salinização no setor inferior do sistema.

Palavras-chave

Modelo Preditivo; Segurança Hídrica; Salinização Estuarina; Sistema de Alerta preditivo; Variabilidade Hidroclimática. Sistema de Alerta preditivo

Abstract

This study assesses the water and environmental vulnerability of the lower portion of the Itapecuru River basin, Maranhão, Brazil, in response to changes in the hydrological regime and anthropogenic pressures, with emphasis on salinization and water quality degradation. By integrating historical time series (1992–2024), hydroclimatic analyses, including MEI/ENSO, physicochemical monitoring, and modeling approaches (GAM and Random Forest), we characterized spatiotemporal gradients, trends, and risk thresholds. A consistent increase in electrical conductivity and pH was observed in the lower reach, along with greater variability during the 2010s and an association among ENSO phases, reduced river discharge, and intensification of the saline signal. The GAMs indicated significant temporal trends for conductivity and pH, whereas the Random Forest model, interpreted using SHAP, identified river discharge, turbidity, and pH as key predictors of conductivity. Two prospective scenarios, water abundance versus critical drought, illustrate how the combination of reduced freshwater input and anthropogenic pressures increases the risk of saline intrusion, with direct implications for the security of water supply through the ITALUÍS System. Continuous monitoring of conductivity and discharge, integration of alerts based on hydrological thresholds, and adoption of adaptive management measures are recommended to protect water quality and the operation of water intake systems. Electrical conductivity, expressed in $\mu\text{S cm}^{-1}$, was adopted as the main hydrochemical variable indicating salinization processes in the lower sector of the system.

Keywords

predictive modeling; water security; estuarine salinization; early-warning system; hydroclimatic variability.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fluvio-estuarinos estão entre os ambientes mais relevantes para a provisão de água, manutenção da biodiversidade e sustentação de atividades econômicas em zonas costeiras. Ao mesmo tempo, figuram entre os mais vulneráveis às mudanças ambientais contemporâneas, uma vez que a intrusão salina e a degradação da qualidade da água respondem de forma sensível a alterações na descarga fluvial, ao aumento relativo do nível do mar, à morfologia do canal e às pressões antrópicas na bacia de drenagem. Em escala global, projeções recentes indicam tendência de aumento da intrusão salina em grande parte dos estuários do mundo, com papel particularmente importante da elevação do nível do mar e da redução da descarga dos rios, reforçando a necessidade de estudos regionais capazes de identificar controles locais e subsidiar estratégias de adaptação (LEE et al., 2025; MOHAMMED; SCHOLZ, 2017; IPCC, 2022).

A intrusão salina constitui um processo central na interface rio-estuário porque reorganiza gradientes longitudinais de salinidade, sólidos dissolvidos, material particulado em suspensão, nutrientes e oxigênio dissolvido. Sua intensidade é controlada principalmente pela interação entre a vazão fluvial e a energia de maré, embora também responda à geomorfologia, à circulação costeira e às condições meteorológicas e climáticas em múltiplas escalas. Em termos aplicados, a redução da descarga fluvial favorece o avanço da cunha salina para montante, amplia a extensão das zonas de mistura e pode comprometer captações de água localizadas em trechos inferiores de rios costeiros, tornando a salinização um problema simultaneamente ecológico e operacional (SETIAWAN et al., 2023; HUANG et al., 2024; MARTÍN-LLANES; LÓPEZ-RUIZ, 2024).

Essa problemática é particularmente relevante em estuários tropicais, nos quais a sazonalidade hidroclimática e a variabilidade interanual modulam fortemente os processos de mistura, residência da água e transporte de materiais. No Brasil e na América do Sul, a variabilidade associada ao El Niño–Oscilação Sul (ENSO) constitui um importante controlador das anomalias de precipitação e vazão, com reflexos sobre salinidade, estrutura trófica e funcionamento ecológico de sistemas costeiros e estuarinos. Estudos recentes mostram que o ENSO é o principal fenômeno de modulação da

variabilidade interanual da precipitação sul-americana e que suas teleconexões afetam de forma expressiva a hidrologia regional (SOUZA et al., 2021). Evidências recentes também indicam que eventos de ENSO alteram a variabilidade espaço-temporal da salinidade em sistemas estuarinos, por meio de mudanças na precipitação, descarga fluvial e regime de ventos, reforçando a necessidade de abordagens que integrem clima, hidrologia e qualidade da água na avaliação da vulnerabilidade ambiental (BITENCOURT et al., 2020; SILVA et al., 2025).

O rio Itapecuru representa um caso estratégico nesse contexto. A bacia possui cerca de 53.216,84 km², abrange 56 municípios e exerce papel decisivo no abastecimento hídrico do Maranhão, especialmente por meio do Sistema Italuís, responsável pelo suprimento de água da Região Metropolitana de São Luís. Essa centralidade torna o baixo curso do rio particularmente sensível a alterações do regime hidrológico e da qualidade da água, uma vez que a intensificação da influência estuarina e das pressões antrópicas pode repercutir diretamente sobre a segurança operacional do abastecimento e sobre o atendimento aos padrões normativos de qualidade.

Além de sua relevância estratégica, o setor inferior do Itapecuru concentra condições propícias à atuação simultânea de múltiplos estressores, incluindo expansão urbana, lançamento de efluentes domésticos, degradação da vegetação ripária, assoreamento e intrusão salina. Estudos desenvolvidos no próprio estuário já demonstraram que a intrusão de água marinha é uma força organizadora central dos gradientes ambientais locais. Sá et al. (2022a) mostraram que salinidade, sólidos dissolvidos totais (STD) e material particulado em suspensão estruturam fortemente o contínuo rio-estuário e que a intrusão salina se intensifica no período seco, com efeitos relevantes sobre a organização ecológica do sistema.

Em paralelo, Sá et al. (2022b) evidenciaram que a condição trófica do estuário do Itapecuru não é controlada por um único fator, mas pela interação entre salinidade, nutrientes, temperatura, oxigênio dissolvido, hidrodinâmica e pressões antrópicas. Esse resultado é consistente com a literatura internacional sobre sistemas costeiros sob múltiplos estressores, segundo a qual a deterioração da qualidade da água e a intensificação da salinização tendem a emergir da convergência entre forçantes climáticas, redução de descarga fluvial e pressões humanas acumuladas, e não de um único driver isolado (IPCC, 2022; LEE et al., 2025).

Apesar desses avanços, persiste uma lacuna importante. As investigações anteriores ampliaram a compreensão ecológica e trófica do estuário do Itapecuru, mas ainda são escassas abordagens que integrem, em perspectiva temporal mais ampla, a variabilidade hidroclimática, a modulação pelo ENSO, os sinais de salinização, os padrões espaciais e temporais da qualidade da água e a modelagem preditiva de risco com foco explícito na gestão dos recursos hídricos. Essa lacuna é particularmente relevante em sistemas utilizados para abastecimento, nos quais a combinação entre redução de vazão, avanço salino e intensificação de pressões antrópicas podem comprometer tanto a integridade ambiental quanto a conformidade com padrões de qualidade exigidos para usos múltiplos.

Nesse sentido, a integração entre séries históricas, análise hidroclimática, modelagem não linear e algoritmos de aprendizado de máquina oferece uma oportunidade concreta para avançar da descrição diagnóstica para uma estrutura analítica capaz de identificar tendências, reconhecer relações não lineares, hierarquizar fatores de controle e antecipar cenários críticos. Em sistemas flúvio-estuarinos tropicais, esse tipo de abordagem é particularmente promissor porque permite capturar respostas complexas e não lineares da salinização e da qualidade da água frente à interação entre clima, hidrologia e pressões antrópicas.

Diante desse contexto, este estudo parte da hipótese de que o rio Itapecuru apresenta vulnerabilidade hídrica e ambiental crescente, evidenciada pelo avanço da salinização e pela deterioração da qualidade da água, em decorrência de alterações no regime hidrológico moduladas pelo ENSO e intensificadas por pressões antrópicas, com implicações para o abastecimento público e para a manutenção do enquadramento Classe 2. Com base nessa hipótese, o trabalho tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade hídrica e ambiental da Bacia do Rio Itapecuru, com ênfase no baixo curso, frente às mudanças no regime hidrológico e à intensificação das pressões antrópicas, com ênfase na degradação da qualidade da água e em suas implicações para a gestão dos recursos hídricos. Para isso, o estudo: (i) caracteriza a variabilidade espaço-temporal dos parâmetros hidrológicos e dos processos de salinização entre 1992 e 2024; (ii) avalia diferenças espaciais na qualidade da água ao longo do gradiente longitudinal do rio; (iii) investiga tendências temporais dos principais parâmetros entre 2010 e 2022; (iv) modela relações não lineares entre variáveis climáticas, hidrológicas e físico-químicas; e (v)

desenvolve modelos preditivos e cenários prospectivos de risco de salinização e intrusão salina, visando subsidiar a gestão adaptativa da bacia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Mudanças no regime hidrológico em rios tropicais

Rios tropicais são caracterizados por regimes hidrológicos fortemente modulados pela sazonalidade da precipitação, de modo que a alternância entre períodos chuvosos e secos controla a disponibilidade hídrica, a conectividade lateral, o transporte de sedimentos e a dinâmica biogeoquímica dos sistemas aquáticos. No Maranhão, essa variabilidade é condicionada principalmente pela atuação da Zona de Convergência Intertropical e por sistemas atmosféricos regionais, tornando a vazão fluvial particularmente sensível a anomalias pluviométricas e à variabilidade climática interanual (ANA, 2024; MARANHÃO, 2023).

Essa variabilidade natural pode ser amplificada por forçantes climáticas de grande escala, com destaque para o El Niño–Oscilação Sul (ENSO). Em escala sul-americana, o ENSO exerce forte influência sobre a ocorrência de extremos hidrológicos, alterando a frequência e a probabilidade de eventos de estiagem e cheias em diferentes regiões do continente. Dados observados recentes mostram que o ENSO aumenta a probabilidade de ocorrência de extremos de vazão em rios da América do Sul, reforçando seu papel como controlador relevante da variabilidade hidroclimática regional (Petry et al., 2025). Em perspectiva complementar, análises climáticas para a América do Sul mostram que a variabilidade sazonal da precipitação está fortemente associada tanto a componentes ENSO quanto a modos não-ENSO, o que reforça a necessidade de interpretar as respostas hidrológicas a partir da combinação entre teleconexões climáticas e condicionantes locais (SOUZA et al., 2021; TOWNER et al., 2021).

Além da variabilidade interanual, as mudanças climáticas de longo prazo tendem a intensificar a instabilidade dos regimes hidrológicos. O IPCC destaca que as alterações no ciclo hidrológico já afetam a disponibilidade de água, a frequência de eventos extremos e a exposição de ecossistemas aquáticos e populações humanas a riscos hídricos crescentes, especialmente em regiões onde a variabilidade climática natural já é elevada (IPCC, 2022). Em rios tropicais, essas alterações podem comprometer serviços ecossistêmicos, reduzir a resiliência do sistema e aumentar a vulnerabilidade de usos estratégicos da água, como o abastecimento humano (LATRUBESSE et al., 2017; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2020).

2.2 Salinização e intrusão salina em sistemas flúvio-estuarinos tropicais

A salinização em sistemas flúvio-estuarinos tropicais constitui um processo hidroambiental de elevada relevância ecológica e operacional, uma vez que altera gradientes longitudinais de salinidade, sólidos dissolvidos, material particulado em suspensão, nutrientes e oxigênio dissolvido, com repercussões diretas sobre a qualidade da água e a estrutura funcional dos ecossistemas. Em estuários e rios sob influência de maré, a intrusão salina resulta da interação entre descarga fluvial, forçamento de maré, morfologia do canal, circulação costeira e condições meteorológicas, sendo particularmente sensível à redução do aporte de água doce. A literatura recente mostra que a intrusão salina tende a se intensificar em contextos de redução de vazão e elevação do nível do mar, podendo avançar para montante e comprometer usos múltiplos da água, inclusive o abastecimento público (LEE et al., 2025; KHALIL et al., 2025)

Estudos recentes indicam que o aumento global da intrusão salina deve se tornar um padrão mais frequente nas próximas décadas. Em análise global baseada em 18 estuários, observou-se que a intrusão salina futura tende a se intensificar na maior parte dos casos, com aumento do percentual em 89% dos sistemas avaliados. Em média, a elevação do nível do mar contribuiu cerca de duas vezes mais para esse incremento do que a redução da descarga fluvial (LEE et al., 2025). Em escala aplicada, isso significa maior risco para captações de água, agricultura, qualidade ecológica e segurança hídrica em regiões costeiras.

Em sistemas tropicais e subtropicais, a relação entre descarga fluvial e intrusão salina tem sido amplamente documentada como um dos controles mais importantes da resposta estuarina. Estudos recentes mostram que a intrusão salina e o tempo de lavagem estuarina respondem fortemente à disponibilidade de água doce, com limiares hidrológicos abaixo dos quais o sal avança com maior persistência e a renovação da água se torna mais lenta (KHALIL et al., 2025). De modo semelhante, estudos observacionais têm evidenciado que secas, alterações do regime de vazão e controle antrópico do fluxo podem modificar profundamente a circulação estuarina, favorecer a permanência da cunha salina e alterar o papel do sistema como fonte ou retenção de materiais (PAIVA et al., 2021).

No contexto brasileiro, esse tema é especialmente relevante em estuários tropicais de macromaré e em rios costeiros sujeitos a forte sazonalidade hidrológica. No estuário do rio Itapecuru, estudos anteriores demonstraram que a intrusão salina atua

como força organizadora central do contínuo rio-estuário. Sá et al. (2022a) mostraram que a salinidade, os sólidos dissolvidos totais (STD) e o material em suspensão estruturam fortemente os gradientes ambientais locais, com intensificação da intrusão no período seco. Em paralelo, Sá et al. (2022b) evidenciaram que a condição trófica do estuário resulta da interação entre salinidade, nutrientes, temperatura, oxigênio dissolvido, hidrodinâmica e pressões antrópicas, o que reforça a necessidade de interpretar a salinização como processo acoplado à variabilidade hidroclimática e à degradação da qualidade da água. Esse quadro é consistente com a literatura internacional, segundo a qual a deterioração da qualidade da água em estuários sob múltiplos estressores emerge da convergência entre forçantes climáticas, redução de descarga fluvial e pressões humanas acumuladas.

No contexto dos rios tropicais, o processo de salinização assume dinâmicas particulares, fortemente induzidas pela estacionalidade climática e pela redução drástica dos caudais fluviais durante os períodos de estiagem prolongada. Para monitorizar e gerir este fenómeno sob a ótica da gestão adaptativa, a seleção dos parâmetros de qualidade da água deve responder tanto ao rigor analítico quanto à viabilidade prática de recolha de dados em tempo real. Nesse sentido, variáveis como a vazão, a condutividade elétrica, os sólidos dissolvidos totais (SDT), a turbidez e o pH constituem indicadores-chave indispensáveis para o diagnóstico do comportamento hidroambiental da bacia.

Contudo, no que concerne à modelação preditiva e à estruturação de sistemas de alerta precoce, faz-se necessário delimitar com precisão o alcance metodológico do principal indicador adotado. Nesta investigação, a condutividade elétrica é utilizada estritamente como um *proxy* operacional do risco de salinização. Embora um incremento agudo na condutividade elétrica represente o sinal mais célere de estresse salino no ponto de captação do Sistema ITALUÍS, a caracterização definitiva e a validação do fenómeno hidrológico dependem da sua interpretação conjunta com o regime de vazões, os teores de SDT e a dinâmica das marés locais.

2.3 Degradação da qualidade da água, segurança hídrica e gestão de bacias estratégicas

A degradação da qualidade da água em bacias tropicais decorre da interação entre variabilidade hidrológica, uso e cobertura do solo e fontes difusas e pontuais de

poluição. Em períodos de estiagem, a redução da vazão diminui a capacidade de diluição, favorecendo a concentração de sais, nutrientes e material dissolvido; em períodos de chuva intensa, o aumento do escoamento superficial amplia o carreamento de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes para os corpos hídricos, elevando turbidez e instabilidade hidroquímica (WENG et al., 2020; LIU et al., 2020; WANG et al., 2020; LI et al., 2020). Esse comportamento é particularmente importante em bacias com expansão urbana e uso agropecuário intensivo, nas quais a conversão da cobertura vegetal e a ocupação desordenada aumentam a erosão, o transporte de sólidos suspensos e a vulnerabilidade da água bruta captada para abastecimento (DUTRA et al., 2020; ZHI et al., 2021).

No caso do baixo rio Itapecuru, essa problemática assume caráter estratégico. A Introdução da dissertação já estabelece que a bacia desempenha papel decisivo para o abastecimento da Região Metropolitana de São Luís e que o setor inferior é especialmente sensível a alterações do regime hidrológico, à intensificação da influência estuarina e à pressão antrópica local. Assim, a degradação da qualidade da água não deve ser interpretada apenas como problema ecológico, mas também como componente central da segurança hídrica, uma vez que a elevação da condutividade, da turbidez e da variabilidade físico-química pode comprometer a operação de captações e aumentar a complexidade do tratamento.

Nesse contexto, a noção de bacias críticas ganha relevância. Relatórios recentes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico destacam a necessidade de identificar áreas nas quais a combinação entre restrição quali-quantitativa, eventos extremos e pressão antrópica compromete a segurança hídrica e exige respostas de gestão mais integradas (IPCC, 2022). Em escala internacional, a UN-Water define segurança hídrica como a capacidade de uma sociedade salvaguardar acesso sustentável à água em quantidade e qualidade aceitáveis para o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico e a preservação dos ecossistemas. Essa definição é particularmente útil para interpretar bacias tropicais costeiras, nas quais a disponibilidade hídrica e a qualidade da água respondem simultaneamente a forçantes climáticas, hidrológicas e antrópicas.

Para bacias estratégicas como a do Itapecuru, isso implica a necessidade de abordagens que integrem monitoramento contínuo, análise de tendências, modelagem não linear, predição de risco e cenários prospectivos, de modo a apoiar a gestão adaptativa frente a secas, cheias, intensificação da salinização e deterioração progressiva da qualidade da água. Essa perspectiva converge diretamente com o enfoque da presente

dissertação, que busca articular variabilidade hidroclimática, ENSO, qualidade da água e risco de salinização com implicações explícitas para o abastecimento público e para a manutenção do enquadramento em Classe 2.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar a vulnerabilidade hídrica e ambiental da Bacia do Rio Itapecuru (MA), com ênfase na porção inferior, frente às mudanças no regime hidrológico e à intensificação das pressões antrópicas, com ênfase na degradação da qualidade da água e suas implicações para a gestão dos recursos hídricos.

3.2 Objetivos Específicos

Caracterizar a variabilidade espaço-temporal dos parâmetros hidrológicos e dos processos de salinização no rio Itapecuru no período de 1992 a 2024, com ênfase na dinâmica de vazão, precipitação e condutividade elétrica;

Avaliar as diferenças espaciais na qualidade da água ao longo do gradiente longitudinal do rio, identificando padrões associados à dinâmica hidrológica e aos processos de salinização;

Investigar tendências temporais dos principais parâmetros de qualidade da água no período de 2010 a 2022, considerando a influência da sazonalidade hidrológica e de eventos climáticos extremos;

Modelar relações não lineares entre variáveis climáticas, hidrológicas e físico-químicas utilizando Modelos Aditivos Generalizados (GAM);

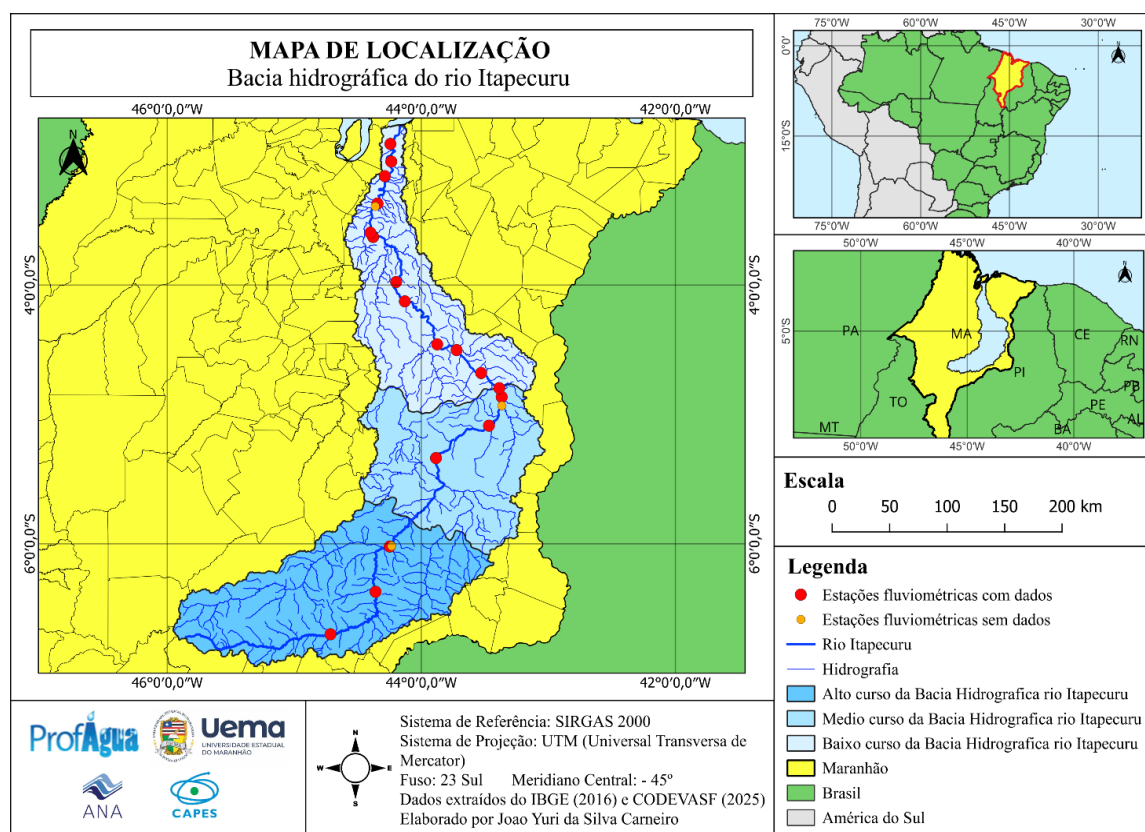
Desenvolver modelos preditivos e cenários prospectivos de risco de salinização/intrusão salina, combinando abordagens de Machine Learning e análise hidroclimática, para subsidiar a gestão adaptativa da bacia do rio Itapecuru.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

A bacia hidrográfica do rio Itapecuru possui área aproximada de 53.216,84 km², correspondendo a cerca de 16% do território do estado do Maranhão, e abrange 56 municípios, dos quais 11 se localizam diretamente às margens do curso principal, incluindo Caxias, Codó, Coroatá e Itapecuru-Mirim. O rio desempenha papel estratégico no abastecimento hídrico estadual, sendo responsável pelo suprimento de aproximadamente 1,6 milhão de pessoas na Região Metropolitana de São Luís por meio do Sistema ITALUÍS, cuja captação é da ordem de 2,0 m³ s⁻¹ (MASULLO et al., 2019; Almeida et al., 2022). A localização da área de estudo e dos pontos de monitoramento é apresentada na Figura 1.

Figura 1. Mapa representativo da área de estudo e localização das estações/pontos de monitoramento.



Fonte: Autoral

A porção inferior da bacia foi definida como área focal deste estudo por apresentar maior sensibilidade às variações do regime hidrológico, à influência estuarina e à intensificação de pressões antrópicas, fatores que podem favorecer a degradação da

qualidade da água e elevar a vulnerabilidade operacional do abastecimento público. Além disso, esse setor concentra condições hidroambientais propícias à ocorrência de processos de salinização e intrusão salina, especialmente em períodos de redução da descarga fluvial.

A interpretação dos resultados considerou como referência os padrões de qualidade aplicáveis a corpos d'água Classe 2, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, bem como diretrizes técnicas nacionais relacionadas ao monitoramento e à gestão de recursos hídricos (ANA, 2020).

Essa referência normativa é essencial porque o baixo Itapecuru não representa apenas um compartimento hidroambiental sob influência estuarina, mas também um setor estratégico para a segurança hídrica regional. A elevação da condutividade elétrica, dos sólidos dissolvidos totais e da turbidez pode repercutir diretamente sobre a operação do Sistema ITALUÍS, aumentando a complexidade do tratamento, reduzindo a previsibilidade da qualidade da água bruta e exigindo respostas operacionais mais rápidas em períodos críticos. Portanto, a análise da salinização foi interpretada à luz da manutenção dos usos compatíveis com corpos d'água Classe 2 e da necessidade de proteger a captação destinada ao abastecimento público.

4.2 Levantamento e integração de dados

Os dados hidrológicos, hidroclimáticos e de qualidade da água utilizados neste estudo foram integrados a partir de diferentes bases institucionais, com o objetivo de ampliar a consistência temporal das séries, reduzir lacunas analíticas e permitir uma abordagem integrada da vulnerabilidade hídrica e ambiental no setor inferior do rio Itapecuru.

Inicialmente, foram identificadas 22 estações fluviométricas distribuídas ao longo da bacia hidrográfica. Após avaliação da consistência dos registros, da continuidade temporal das séries e da adequação dos dados às análises comparativas propostas, o estudo passou a considerar 19 estações nas análises finais. As estações excluídas apresentaram séries incompletas, descontinuidades acentuadas ou insuficiência de registros para sustentar comparações espaço-temporais consistentes.

As séries de vazão fluvial foram obtidas na plataforma Hidroweb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, enquanto os dados pluviométricos foram reunidos a partir de registros da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos

Naturais do Maranhão, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da base CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data*). A integração dessas diferentes fontes permitiu estruturar uma base temporal mais robusta para a avaliação da variabilidade hidrológica e de seus efeitos sobre a qualidade da água no setor inferior do rio.

Para as análises integradas, foi construída uma base composta por 10 parâmetros ambientais: pluviosidade, índice MEI, vazão fluvial, temperatura do ar, temperatura da água, pH, turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e material em suspensão. Esses dados foram obtidos a partir de séries históricas hidrológicas, hidroclimáticas e de campanhas de monitoramento da qualidade da água realizadas ao longo da bacia, compondo um banco consolidado voltado à caracterização das condições ambientais do sistema e ao suporte das análises estatísticas e preditivas.

O estudo utilizou séries temporais referentes ao período de 1992 a 2024. Após a consolidação, triagem e compatibilização dos registros provenientes das diferentes bases consultadas, foram consideradas 640 observações por variável para as análises integradas. As séries de pluviosidade e vazão foram organizadas em escalas mensal e anual, permitindo análises de variabilidade, comparação temporal e modelagem hidroclimática.

Antes das análises, os bancos de dados passaram por etapa de pré-processamento, incluindo conferência de unidades, padronização de nomenclaturas, ordenamento cronológico dos registros e verificação de inconsistências, como duplicidades, lacunas temporais e valores extremos incompatíveis com a variação esperada das variáveis. Registros claramente inconsistentes ou sem suporte mínimo de continuidade temporal foram excluídos das análises específicas em que comprometeriam a comparabilidade dos resultados.

Como os dados foram provenientes de fontes distintas, foi realizada padronização temporal entre os bancos, de modo a compatibilizar os registros em uma mesma estrutura cronológica de análise. Essa harmonização permitiu integrar séries com diferentes origens institucionais em um banco consolidado, preservando-se apenas os dados com consistência mínima para comparações temporais, espaciais e preditivas.

A condutividade elétrica, expressa em $\mu\text{S cm}^{-1}$, foi adotada como principal variável hidroquímica indicadora dos processos de salinização no setor inferior do sistema. Em conjunto, os parâmetros analisados forneceram a base para investigar a

relação entre variabilidade climática, regime hidrológico e degradação da qualidade da água na bacia do rio Itapecuru.

A tabela 1 mostra a matriz de especificação amostral, onde podemos verificar as fontes, os componentes da análise e as variáveis analisadas de forma geral.

Tabela 1 - Matriz de especificação amostral, fontes regulamentares e governança dos dados hidroambientais na Bacia do Rio Itapecuru (1999–2024).

Componente da Análise	Fonte dos dados	Variáveis Analisadas
Qualidade da Água e Hidrometria	ANA / SNIRH (Plataforma Hidroweb)	Condutividade elétrica, Vazão (Q), pH, Turbidez, Temperatura da água, Oxigênio dissolvido e Sólidos em suspensão.
Climatologia	INMET, SEMA-MA e Base CHIRPS	Precipitação mensal acumulada, Temperatura do ar e Anomalias de pluviosidade.
Teleconexões Climáticas	NOAA (Physical Sciences Laboratory)	<i>Multivariate ENSO Index</i> (MEI).

Fonte: Autoral

4.3 Integração climática e caracterização do ENSO

A integração entre os componentes climáticos e hidrológicos foi realizada por meio da análise conjunta das séries históricas de pluviosidade, vazão fluvial e fases do El Niño–Oscilação Sul, representadas pelo *Multivariate ENSO Index* (MEI), obtido no *Physical Sciences Laboratory da National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Essa abordagem permitiu examinar a modulação hidroclimática interanual do sistema, identificar defasagens entre os regimes pluviométricos e a resposta hidrológica do rio e avaliar o papel combinado de forçantes climáticas de grande escala e condicionantes locais na organização dos padrões observados.

O MEI foi utilizado por constituir um índice integrado de variabilidade climática amplamente empregado na caracterização dos eventos ENSO. Valores positivos foram interpretados como indicativos de condições associadas ao El Niño, enquanto valores negativos representaram condições de La Niña. A incorporação desse índice às análises permitiu discutir, em perspectiva temporal ampliada, como a variabilidade climática

interanual pode influenciar a descarga fluvial, a dinâmica de mistura e, conseqüentemente, a qualidade da água e os sinais de salinização no setor inferior do rio Itapecuru.

A magnitude dos eventos foi classificada conforme a intensidade do índice, sendo considerados fracos (0,5–1,0), moderados (1,0–1,5), fortes (1,5–2,0) e muito fortes (>2,0). Essas informações foram integradas às séries hidrológicas para avaliar possíveis associações entre a variabilidade climática interanual e as respostas hidrológicas e hidroquímicas observadas no sistema fluvial.

4.4 Análises estatísticas

O pré-processamento da base incluiu verificação de inconsistências, inspeção de valores extremos e organização das séries em formatos compatíveis com análises univariadas, multivariadas e preditivas. Inicialmente, foram realizadas análises exploratórias e estatística descritiva para caracterizar a distribuição dos parâmetros ambientais. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene, permitindo a definição entre procedimentos paramétricos e não paramétricos nas comparações espaciais e temporais. Foi adotado nível de significância de 5% ($p < 0,05$) em todas as análises inferenciais.

O tratamento dos valores ausentes foi realizado de forma conservadora, considerando a origem heterogênea das séries e a necessidade de evitar a criação artificial de padrões hidroambientais. Registros com ausência na variável-resposta das análises preditivas, especialmente condutividade elétrica, foram excluídos da base de modelagem, uma vez que não poderiam contribuir para o treinamento supervisionado. Para as variáveis explicativas, foram mantidas apenas as observações com informação simultânea suficiente para compor a matriz final de preditores. Assim, a modelagem preditiva foi conduzida por análise de casos completos, evitando imputações automáticas por média, mediana ou interpolação linear que pudessem suavizar eventos extremos ou distorcer relações não lineares entre vazão, pluviosidade, turbidez, pH e condutividade elétrica.

As lacunas temporais foram avaliadas durante a etapa de consistência das séries. Observações isoladas com ausência em variáveis não utilizadas em determinada análise foram mantidas apenas nas etapas descritivas em que não comprometeriam o cálculo estatístico específico. Por outro lado, análises multivariadas e preditivas foram executadas somente com matrizes completas para o conjunto de variáveis selecionado. Essa decisão

metodológica buscou preservar a comparabilidade entre amostras, reduzir vieses decorrentes de preenchimentos artificiais e manter a rastreabilidade das observações efetivamente utilizadas em cada etapa analítica.

As comparações espaciais ao longo do gradiente longitudinal do rio foram conduzidas por meio do teste de Kruskal–Wallis, seguido do teste de Dunn para comparações múltiplas, a fim de identificar diferenças entre os cursos do rio nas variáveis físico-químicas analisadas.

A estrutura multivariada dos dados ambientais foi examinada por meio de PERMANOVA (*Permutational Multivariate Analysis of Variance*), considerando os fatores curso, década e sazonalidade, bem como suas interações, a partir de matrizes de distância e procedimentos permutacionais. A homogeneidade das dispersões multivariadas foi avaliada por PERMDISP, enquanto os padrões de ordenação e os principais gradientes hidroambientais foram visualizados por NMDS (*Non-metric Multidimensional Scaling*), com ajuste de vetores ambientais significativos quando aplicável.

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (versão 4.2.2), com uso de pacotes compatíveis com cada etapa analítica, incluindo rstatix para testes univariados, vegan para análises multivariadas e ordenação, e ggplot2 para visualização gráfica dos resultados. As análises univariadas e multivariadas foram empregadas de forma complementar com o propósito de identificar padrões espaciais e temporais da qualidade da água e sua relação com os processos de salinização e com a variabilidade hidroclimática no rio Itapecuru.

4.5 Modelos aditivos generalizados

Os Modelos Aditivos Generalizados (*Generalized Additive Models – GAM*) foram empregados para avaliar as tendências temporais das variáveis ambientais ao longo da série histórica analisada. Essa abordagem foi escolhida por sua capacidade de representar relações não lineares entre as variáveis-resposta e o tempo, permitindo identificar padrões suaves de variação ao longo dos anos sem impor uma forma funcional linear pré-definida.

Os modelos foram ajustados separadamente para cada variável ambiental, tendo o ano como variável explicativa suavizada, representada pelo termo (ano). Foram

analisadas as seguintes variáveis: condutividade elétrica, material em suspensão, pH, temperatura da água e turbidez.

Os ajustes foram realizados com funções suaves do tipo spline, adequadas para a detecção de tendências temporais não lineares. A significância dos modelos foi avaliada com base no grau de liberdade efetivo (edf), na estatística F, no R^2 ajustado e no p-valor associado ao termo suavizado, permitindo identificar quais variáveis apresentaram variação temporal estatisticamente significativa ao longo do período analisado.

Os resultados dos modelos foram apresentados graficamente por meio das curvas ajustadas, acompanhadas dos respectivos intervalos de confiança, e sintetizados em tabela com os principais parâmetros diagnósticos. Essa etapa foi conduzida no ambiente R com emprego do pacote *mgcv*.

4.6 Modelagem preditiva por Random Forest e interpretação por SHAP

A modelagem preditiva foi conduzida com o algoritmo Random Forest, após etapa prévia de padronização da base de dados, correção de inconsistências na nomenclatura das variáveis e conversão da variável temporal “década” para o tipo categórico. Para reduzir a assimetria das distribuições e estabilizar a variância, foi aplicada a transformação $\log(x + 1)$ à variável-resposta e a preditores contínuos selecionados, incluindo condutividade elétrica, vazão fluvial, pluviosidade e turbidez. Adicionalmente, foi construída uma variável de interação entre descarga do rio e pluviosidade, com o objetivo de representar efeitos combinados entre processos hidrológicos potencialmente relevantes para a dinâmica hidroquímica do sistema.

A base final de modelagem foi composta pela condutividade elétrica log-transformada como variável-resposta, utilizada como indicador hidroquímico associado ao avanço da salinização, e pelas variáveis explicativas vazão fluvial, pH, décadas, turbidez, interação entre descarga do rio e pluviosidade, pluviosidade e temperatura da água.

A modelagem foi implementada no ambiente R (versão 4.2.2), com uso dos pacotes *caret* e *RandomForest*. O algoritmo baseia-se na construção de múltiplas árvores de decisão a partir de amostras obtidas por bootstrap, combinando suas predições para aumentar a capacidade preditiva e reduzir o risco de sobreajuste. Durante o treinamento, a cada divisão dos nós foi considerado um subconjunto aleatório de variáveis, cujo tamanho foi controlado pelo parâmetro *mtry*. Esse parâmetro foi otimizado

automaticamente por meio de busca em grade, com avaliação de cinco valores candidatos ($\text{tuneLength} = 5$) e seleção do modelo com melhor desempenho médio.

O desempenho preditivo foi avaliado por validação cruzada repetida, com cinco partições e três repetições, totalizando 15 reamostragens. Essa estratégia foi adotada para reduzir a variabilidade associada a uma única partição dos dados e produzir estimativas mais robustas do desempenho do modelo. As previsões geradas em cada reamostragem foram utilizadas tanto para o cálculo das métricas quanto para a avaliação da estabilidade do ajuste.

No particionamento da validação cruzada, a base de dados foi dividida aleatoriamente em cinco subconjuntos aproximadamente equivalentes. Em cada rodada, quatro subconjuntos foram utilizados para ajuste do modelo e um subconjunto foi reservado para teste. Esse procedimento foi repetido até que todos os subconjuntos fossem utilizados como teste, e o ciclo completo foi repetido três vezes com novas partições aleatórias, totalizando 15 reamostragens. As métricas RMSE, MAE e R^2 foram calculadas a partir das previsões geradas nas reamostragens, permitindo avaliar tanto o desempenho médio quanto a estabilidade do modelo.

Embora essa estratégia reduza a dependência de uma única divisão treino-teste, reconhece-se que séries hidroambientais podem apresentar autocorrelação temporal e dependência espacial entre observações. Portanto, os resultados da validação cruzada devem ser interpretados como avaliação interna e exploratória da capacidade preditiva do modelo, e não como validação definitiva para previsão operacional futura. Para etapas posteriores de implantação, recomenda-se complementar essa abordagem com validação temporal por blocos, janelas móveis ou teste independente com dados coletados após o período de calibração.

Não obstante a robustez da validação cruzada repetida para mitigar a variabilidade amostral, a literatura adverte que a repartição puramente aleatória (*random splitting*) de séries temporais hidroambientais impõe o risco latente de vazamento de dados (*temporal data leakage*), conforme apontado por Roberts et al. (2017). Esse fenômeno decorre da autocorrelação estocástica intrínseca das variáveis fluviais, onde a proximidade cronológica entre os subconjuntos de treino e teste pode inflar artificialmente as métricas de acerto do algoritmo. Sob essa perspectiva, reconhece-se que esquemas de validação temporal complementar, tais como a validação cruzada por blocos

(*blocked cross-validation*) ou por janelas móveis (*rolling-window*), seriam teoricamente mais adequados para mensurar a capacidade de generalização do modelo diante de horizontes futuros inéditos (Hyndman; Athanasopoulos, 2021). Contudo, devido à natureza exploratória da modelagem e à necessidade de reter a densidade amostral máxima para capturar eventos extremos esparsos na série histórica, optou-se pela manutenção do método aleatório repetido, cujas implicações e limitações associadas são discutidas criticamente na seção de limitações do modelo.

A qualidade do modelo foi quantificada por meio do erro quadrático médio da raiz (*root mean square error*, RMSE), do erro absoluto médio (*mean absolute error*, MAE) e do coeficiente de determinação (R^2). A qualidade do ajuste foi adicionalmente examinada pela comparação entre valores observados e preditos e pela análise dos resíduos, por meio de gráficos de dispersão, histogramas de resíduos e boxplots das métricas de desempenho, permitindo avaliar a distribuição dos erros, a presença de vies sistemático e a estabilidade do modelo ao longo das reamostragens.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

O Erro Absoluto Médio (MAE) quantifica o desvio mantendo a unidade original dos dados ($\mu\text{S/cm}$). Ele indica a oscilação média regular das previsões, permitindo avaliar se essa margem de incerteza compromete o atendimento aos limites regulatórios de qualidade da água. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) diferencia-se por penalizar com maior rigor os grandes desvios, funcionando como um detector de riscos para eventos extremos. Um RMSE elevado alerta que o modelo pode falhar criticamente em cenários atípicos, subestimando picos sazonais de salinização e reduzindo o tempo de resposta para manobras na captação. Por fim, o Coeficiente de Determinação (R^2) mede

a proporção da variabilidade capturada pelo algoritmo, atestando a consistência estrutural da modelagem frente à dinâmica sazonal da bacia e conferindo legitimidade técnica aos alertas emitidos.

A qualidade do ajuste foi adicionalmente examinada pela comparação entre valores observados e preditos e pela análise dos resíduos, definidos como a diferença entre valores preditos e observados. Para essa etapa, foram empregados gráficos de dispersão, histogramas de resíduos e boxplots das métricas de desempenho, permitindo avaliar a distribuição dos erros, a presença de viés sistemático e a estabilidade do modelo ao longo das reamostragens.

A relevância relativa das variáveis explicativas foi avaliada por duas abordagens complementares. A primeira correspondeu à importância global baseada na redução do erro do modelo, obtida via *caret*. A segunda utilizou as métricas internas do Random Forest, incluindo o aumento percentual do erro médio após permutação das variáveis (*%IncMSE*) e a redução da impureza dos nós (*IncNodePurity*). Em conjunto, essas métricas permitiram identificar a contribuição relativa de cada preditor para o desempenho do modelo.

Como complemento interpretativo, foi empregada a abordagem SHAP (*SHapley Additive exPlanations*), implementada com os pacotes *fastshap* e *shapviz*. Essa técnica permitiu decompor as predições do modelo em contribuições individuais de cada variável explicativa, favorecendo uma interpretação mais transparente da direção e da magnitude dos efeitos ao longo do gradiente de valores observados. Os valores SHAP foram estimados por simulação de Monte Carlo ($n_{sim} = 30$) e analisados por meio de medidas de importância global, gráficos do tipo beeswarm, gráficos de dependência e explicações locais. Essa abordagem possibilitou examinar relações não lineares, limiares e potenciais interações entre os preditores associados à variabilidade da condutividade elétrica.

5. RESULTADOS

5.1 Dinâmica Climática e Hidrológica da Bacia do Itapecuru

A variabilidade interanual da pluviosidade, da vazão e do índice MEI entre 1992 e 2024 é apresentada na Figura 2. Ao longo da série, o MEI variou entre $-1,60$ e $1,52$, indicando a ocorrência de episódios moderados a relativamente intensos associados, respectivamente, às fases La Niña e El Niño. A distribuição do índice manteve-se centrada

em valores próximos de zero (mediana = $-0,01$; média = $-0,03$), sugerindo predominância de condições neutras na maior parte do período analisado.

A pluviosidade média mensal agregada apresentou ampla variabilidade interanual (mínimo = 4,60 mm; máximo = 262,99 mm; média = 91,64 mm; mediana = 83,56 mm). A maior pluviosidade foi registrada em 2024, atingindo aproximadamente 262,99 mm, enquanto o menor valor ocorreu em um ano caracterizado por condições extremamente secas dentro da série.

A vazão média anual apresentou comportamento coerente com o regime pluviométrico, variando entre $32,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $168,08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (média = $78,74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; mediana = $74,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). e atingindo seu máximo no mesmo ano de pluviosidade (Figura 2b), reforçando a dependência da descarga fluvial em relação ao aporte pluviométrico.

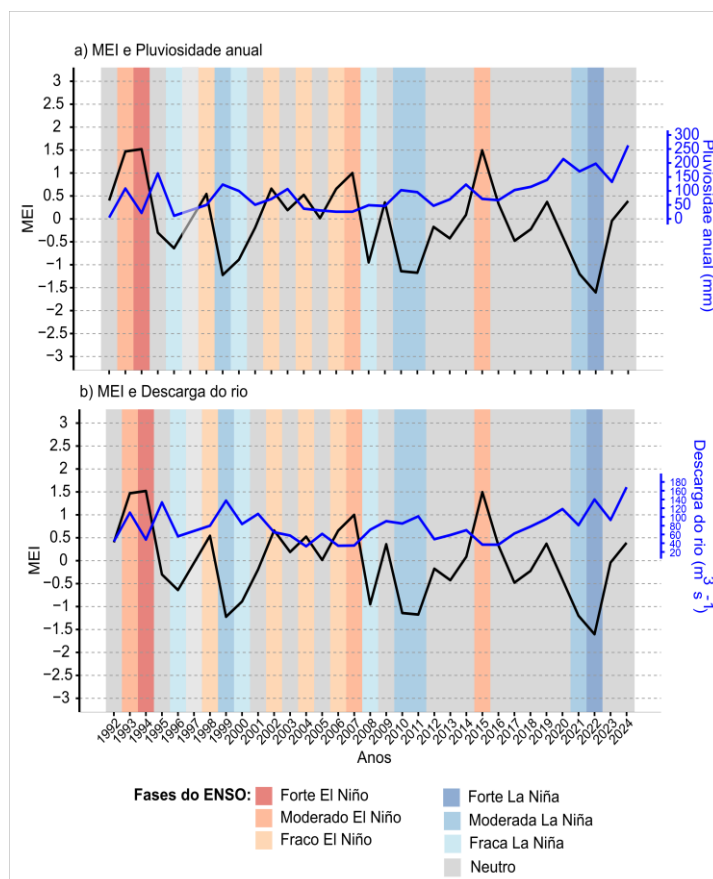
De acordo com a Figura 2, períodos associados a valores positivos do MEI (condições de El Niño) coincidem com variações na pluviosidade e na vazão ao longo da série, enquanto valores negativos do índice (condições de La Niña) estão associados a períodos de menor descarga fluvial, particularmente observados no início da década de 2000 e novamente no início da década de 2020. Essas oscilações climáticas refletem a influência da variabilidade associada ao ENSO na modulação das condições hidrológicas da região.

De acordo com a Figura 2, a análise visual sugere tendências de correspondência temporal entre os picos do índice MEI e as oscilações hidroclimatológicas locais, embora tais associações devam ser interpretadas estritamente como evidências exploratórias. Observa-se, em caráter preliminar, que períodos associados a valores persistentemente positivos do MEI (fases de El Niño) coincidem com flutuações na pluviosidade e na vazão ao longo da série, ao passo que valores negativos do índice (fases de La Niña) parecem se alinhar a janelas de menor descarga fluvial, como as detectadas no início das décadas de 2000 e 2020.

Essas oscilações macroclimáticas refletem padrões indicativos do potencial influência associada ao ENSO na modulação do comportamento hidrológico regional. Contudo, em virtude da natureza descritiva e não paramétrica desta etapa observacional, os alinhamentos gráficos sinalizam hipóteses de acoplamento hidroclimático que necessitam de investigações futuras baseadas em modelagem de defasagem temporal,

uma vez que fatores dinâmicos locais da própria podem amortecer ou retardar as respostas fluviais aos eventos globais extremos

Figura 2. Variabilidade interanual do Multivariate ENSO Index (MEI), da pluviosidade anual e da descarga fluvial entre 1992 e 2024. (a) Relação entre o MEI e a pluviosidade anual média. (b) Relação entre o MEI e a vazão média anual do rio. A linha preta representa os valores do MEI, enquanto as linhas azuis indicam a pluviosidade (mm) e a descarga fluvial ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), respectivamente.



Fonte: Autoral

Os extremos hidrológicos observados na série destacam o ano de 2024 como o período de maior intensidade hidrológica, quando ocorreram simultaneamente os máximos de pluviosidade (262,99 mm) e vazão (168,08 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Em contraste, os valores mínimos de pluviosidade (4,60 mm) e vazão (32,90 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) indicam períodos de condições hidrológicas mais restritivas, evidenciando a amplitude da variabilidade interanual observada no sistema (Figura 2 a-b).

5.2 Variação multivariada dos dados ambientais

A análise de variância permutacional (PERMANOVA) revelou que a variação dos dados ambientais foi significativamente influenciada pelos fatores curso ($R^2 = 0,070$; $p < 0,001$), década ($R^2 = 0,034$; $p < 0,001$) e sazonalidade ($R^2 = 0,056$; $p < 0,001$), indicando que esses fatores atuam como os principais determinantes da estrutura dos dados (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise de variância permutacional (PERMANOVA) avaliando os efeitos de curso, década e sazonalidade sobre a variação dos dados ambientais. Os valores de p obtidos por 999 permutações. Os códigos de significância seguem: *** $p \leq 0,001$; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; ns = não significativo.

Fator	Df	Soma de Quadrados	R^2	F	p-valor	Signif.
Curso	2	486,0	0,070	25,72	0,001	***
Década	3	235,9	0,034	8,32	0,001	***
Sazonal	1	389,0	0,056	41,17	0,001	***
Curso $\times$ Década	6	68,4	0,009	1,21	0,202	ns
Curso $\times$ Sazonal	2	101,2	0,014	5,35	0,001	***
Década $\times$ Sazonal	3	71,0	0,010	2,50	0,006	**
Curso $\times$ Década $\times$ Sazonal	6	43,3	0,006	0,76	0,784	ns
Resíduo	58	5536,4	0,798			
	6					
Total	60	6931,1	1,000			
	9					

Entre as interações, a combinação entre curso e sazonalidade foi significativa ($R^2 = 0,014$; $p < 0,001$), sugerindo que os padrões sazonais variam entre os cursos. A interação entre década e sazonalidade também foi significativa ($R^2 = 0,010$; $p = 0,006$), evidenciando mudanças nos padrões sazonais ao longo do tempo. Por outro lado, a interação entre curso e década não foi significativa ($R^2 = 0,009$; $p = 0,202$), assim como a interação entre curso, década e sazonalidade ($R^2 = 0,006$; $p = 0,784$), indicando ausência de efeitos combinados relevantes entre esses fatores.

A análise de homogeneidade de dispersão multivariada (PERMDISP) indicou que não houve diferenças significativas na dispersão entre os grupos para os fatores curso ($p = 0,146$) e sazonalidade ($p = 0,183$). Os resultados indicam diferenças significativas na dispersão entre as décadas ($p < 0,001$), com destaque para a década de 2010, que

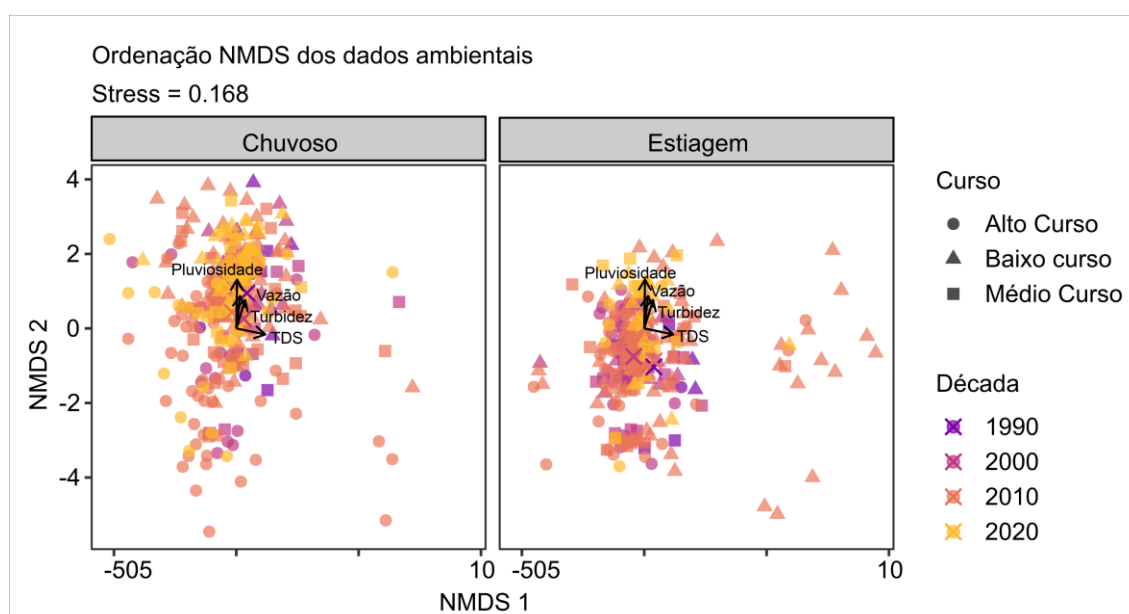
apresentou maior variabilidade. Testes *post hoc* indicaram diferenças significativas principalmente entre as décadas de 2010 e 2000, bem como entre 2010 e 2020 (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da análise de homogeneidade de dispersão multivariada (PERMDISP) para os fatores curso, sazonalidade e década (distância Euclidiana). Os códigos de significância seguem: *** $p \leq 0,001$; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; ns = não significativo.

Fator	Df (grupo)	Df (resíduo)	Soma de Quadrados	F	p-valor	Signif.
Curso	2	607	7,69	1,9323	0,1457	ns
Sazonal	1	608	4,10	1,7777	0,1829	ns
Década	3	606	47,64	7,4818	<0,001	***

A ordenação NMDS apresentou stress de 0,168, indicando ajuste adequado. Observou-se ampla sobreposição entre os cursos, sugerindo baixa diferenciação espacial, e leve separação entre os períodos sazonais, com maior dispersão no período chuvoso (Figura 3).

Figura 3. Ordenação NMDS dos dados ambientais com base na distância Euclidiana, discriminando as amostras por década (cores) e curso (formas), com separação entre períodos sazonais. Os símbolos em cruz indicam os centróides de cada década em cada período sazonal.



Fonte: Autoral

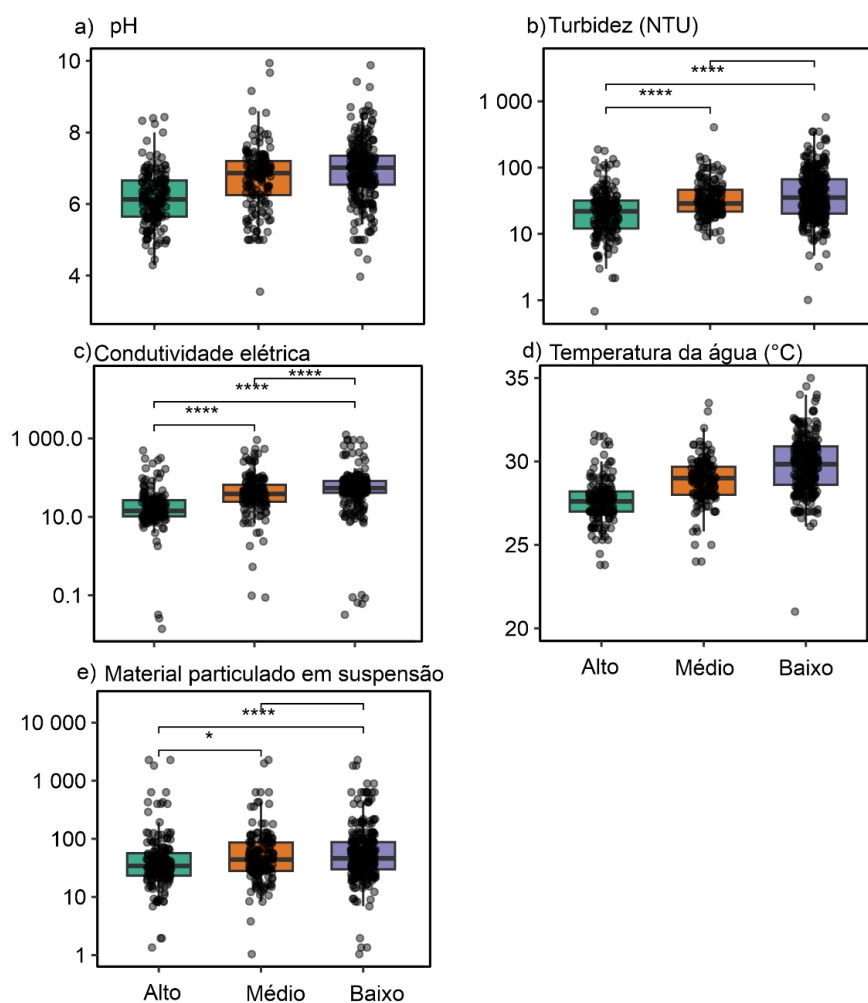
A análise das variáveis ambientais indicou que pluviosidade ($NMDS_1 = 0,022$; $NMDS_2 = 0,937$; 18,65%; $p = 0,001$), STD ($NMDS_1 = 0,850$; $NMDS_2 = -0,115$; 17,06%; $p = 0,001$), vazão ($NMDS_1 = 0,113$; $NMDS_2 = 0,621$; 12,56%; $p = 0,001$) e turbidez ($NMDS_1 = 0,256$; $NMDS_2 = 0,545$; 11,98%; $p = 0,001$) foram os principais fatores estruturantes da ordenação, totalizando aproximadamente 60% da contribuição relativa.

5.3 Variação espacial da qualidade da água da Bacia do Itapecuru

A Figura 4 indica um claro gradiente longitudinal nas características físico-químicas da água, com aumento de pH, turbidez, condutividade e temperatura em direção ao baixo curso do rio.

Figura 4 - Diferenças entre alto, médio e baixo curso nas variáveis físico-químicas: (a) pH; (b) turbidez; (c) condutividade elétrica; (d) temperatura da água; (e) material particulado em suspensão. Boxplots mostram mediana, intervalo interquartil e dispersão, com pontos individuais. Diferenças testadas por Kruskal–Wallis e pós-teste de Dunn; colchetes indicam comparações significativas (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$). Turbidez, condutividade elétrica/específica e material particulado estão em escala logarítmica.

Diferenças entre cursos



Fonte: Autoral

O teste de Kruskal–Wallis revelou diferenças estatisticamente significativas entre os cursos do rio para todas as variáveis analisadas: pH ($H = 94,99$, $p < 0,001$), turbidez ($H = 49,93$, $p < 0,001$), condutividade elétrica ($H = 153,86$, $p < 0,001$), condutividade específica ($H = 112,32$, $p < 0,001$), temperatura da água ($H = 173,47$, $p < 0,001$) e material particulado em suspensão ($H = 16,85$, $p < 0,001$).

As comparações múltiplas (teste de Dunn) indicaram padrões distintos ao longo do gradiente longitudinal do rio. Para pH, diferenças significativas foram observadas entre todos os cursos do rio, incluindo alto e baixo curso ($p < 0,001$), alto e médio curso ($p < 0,001$) e médio e baixo curso ($p = 0,044$), indicando um aumento progressivo do pH ao longo do gradiente fluvial (Figura 4a).

A turbidez apresentou diferenças significativas entre o alto curso e o baixo curso ($p < 0,001$) e entre o alto e o médio curso ($p < 0,001$), enquanto não houve diferença

significativa entre o médio e o baixo curso ($p = 0,449$) (Figura 4b). Esse padrão sugere que o incremento de partículas em suspensão ocorre principalmente na transição do alto para o médio curso, mantendo-se relativamente semelhante entre médio e baixo curso.

Para condutividade elétrica, todas as comparações entre cursos foram significativas: alto versus baixo curso ($p < 0,001$), alto versus médio curso ($p < 0,001$) e médio versus baixo curso ($p = 0,001$), evidenciando um aumento consistente da condutividade no sentido montante–jusante (Figura 4c). Resultados semelhantes foram observados para a condutividade específica, com diferenças significativas entre alto e baixo curso ($p < 0,001$), alto e médio curso ($p < 0,001$) e médio e baixo curso ($p < 0,001$) (Figura 4d), reforçando a intensificação do sinal de mineralização/salinização no setor inferior.

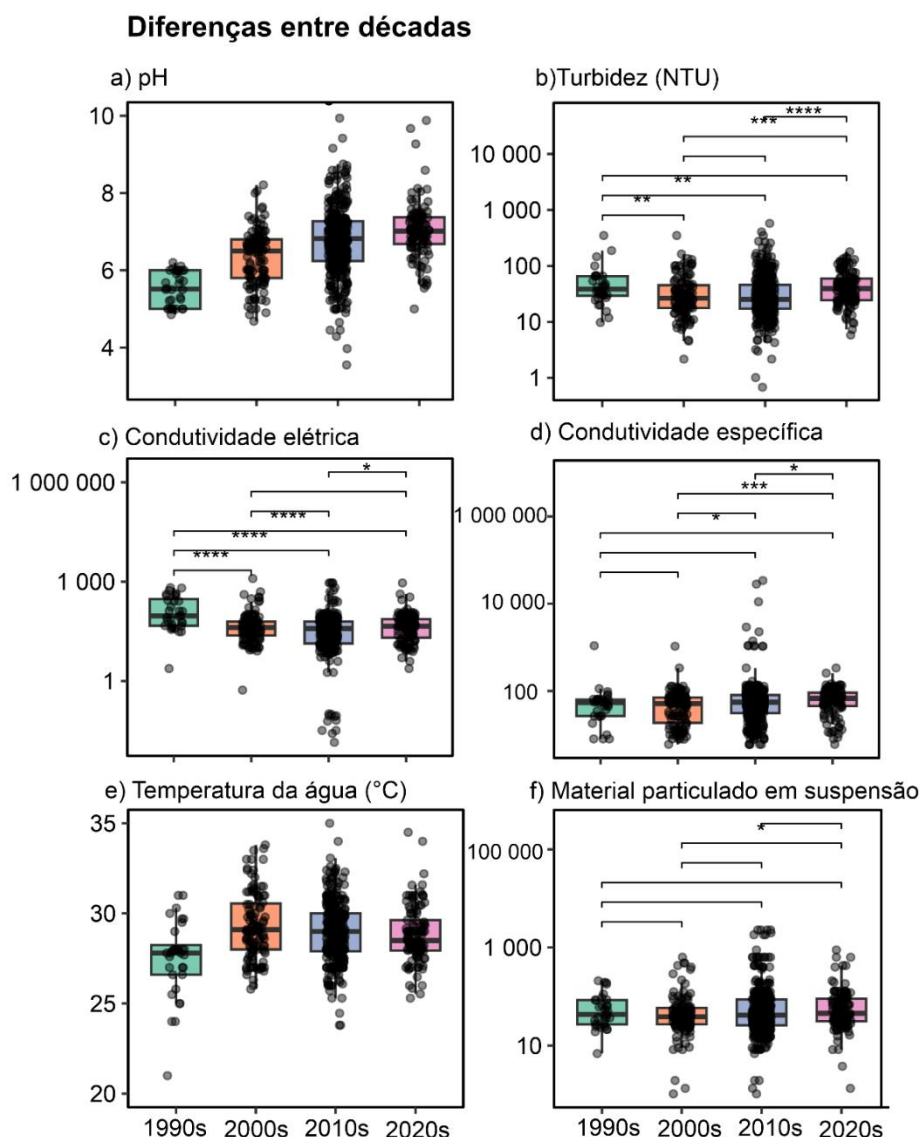
A temperatura da água também diferiu significativamente entre todos os cursos do rio, incluindo alto versus baixo curso ($p < 0,001$), alto versus médio curso ($p < 0,001$) e médio versus baixo curso ($p < 0,001$), indicando aumento térmico progressivo ao longo do rio (Figura 4e). Para material particulado em suspensão, foram observadas diferenças significativas entre alto e baixo curso ($p < 0,001$) e entre alto e médio curso ($p = 0,030$), enquanto não houve diferença significativa entre médio e baixo curso ($p = 0,797$) (Figura 4f). Em conjunto, os resultados confirmam que o baixo curso tende a concentrar as condições mais críticas sob a ótica de qualidade da água, especialmente quando associado a períodos de menor descarga fluvial, aspecto que será retomado nas análises de modelagem e vulnerabilidade.

5.4 Variação temporal da qualidade da água da Bacia do Itapecuru

A Figura 5 apresenta a variação temporal das variáveis físico-químicas da água entre as décadas analisadas (1990s-2020s). De modo geral, observa-se um aumento gradual do pH ao longo do período de estudo, enquanto turbidez, condutividade e temperatura exibem oscilações interdecadais com padrões menos monotônicos.

Figura 5 - Diferenças entre décadas (1990s, 2000s, 2010s e 2020s) nas variáveis físico-químicas: (a) pH; (b) turbidez (NTU); (c) condutividade elétrica; (d) temperatura da água (°C); (e) material particulado em suspensão. Boxplots mostram mediana, intervalo interquartil e dispersão, com pontos individuais. Diferenças testadas por Kruskal–Wallis e pós-teste de Dunn; colchetes indicam comparações significativas (* $p < 0,05$; ** $p <$

0,01; *** $p < 0,001$; **** $p < 0,0001$). Turbidez, condutividade elétrica/específica e material particulado estão em escala logarítmica



Fonte: Autoral

O teste de Kruskal–Wallis indicou diferenças significativas entre as décadas para a maioria das variáveis analisadas (Figura 5): pH ($H = 97,45$, $p < 0,001$; Figura 5a), turbidez ($H = 25,68$, $p < 0,001$; Figura 5b), condutividade elétrica ($H = 34,66$, $p < 0,001$; Figura 5c), condutividade específica ($H = 12,50$, $p = 0,006$; Figura 5d) e temperatura da água ($H = 19,21$, $p < 0,001$; Figura 5e). Em contraste, material particulado em suspensão não apresentou diferenças significativas entre as décadas ($H = 5,59$, $p = 0,133$; Figura 5f).

As comparações múltiplas (teste de Dunn) mostraram que o pH diferiu significativamente entre todas as décadas (Figura 5a), incluindo 1990s–2000s ($p < 0,001$),

1990s–2010s ($p < 0,001$), 2000s–2010s ($p < 0,001$), 1990s–2020s ($p < 0,001$), 2000s–2020s ($p < 0,001$) e 2010s–2020s ($p = 0,029$), indicando um aumento progressivo do pH ao longo do período analisado.

Para turbidez (Fig. 5b), diferenças significativas foram observadas entre 1990s e 2000s ($p = 0,045$), 1990s e 2010s ($p = 0,026$), 2000s e 2020s ($p = 0,002$) e 2010s e 2020s ($p < 0,001$). Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre 2000s e 2010s nem entre 1990s e 2020s, indicando um comportamento interdecadal com mudanças concentradas em pares específicos.

A condutividade elétrica (Figura 5c) apresentou diferenças significativas entre a década de 1990 e as demais décadas (1990s–2000s, 1990s–2010s e 1990s–2020s; $p < 0,001$ em todos os casos), enquanto as comparações entre as décadas posteriores não foram significativas. Para condutividade específica (Figura 5d), apenas a comparação entre 2000s e 2020s foi significativa ($p = 0,005$), sugerindo contraste pontual entre essas décadas e elevada variabilidade interna nas demais, o que é consistente com a presença de valores extremos e ampla dispersão.

A temperatura da água (Figura 5e) apresentou diferenças significativas entre 1990s e 2000s ($p < 0,001$), 1990s e 2010s ($p < 0,001$) e 1990s e 2020s ($p = 0,014$), indicando temperaturas mais baixas na década de 1990 em comparação às décadas subsequentes. Por fim, para o material particulado em suspensão (Fig. 5f), o teste de Dunn indicou diferença significativa apenas entre 2010s e 2020s ($p < 0,05$), enquanto as demais comparações não foram significativas, evidenciando que a variação interdecadal desse parâmetro se concentra no contraste entre o período mais recente e a década imediatamente anterior (Tabela 4).

Tabela 4. Estatísticas descritivas (média $\pm$ desvio padrão) das variáveis de qualidade da água ao longo do curso do rio (alto, médio e baixo curso) e entre décadas (1990–2020).

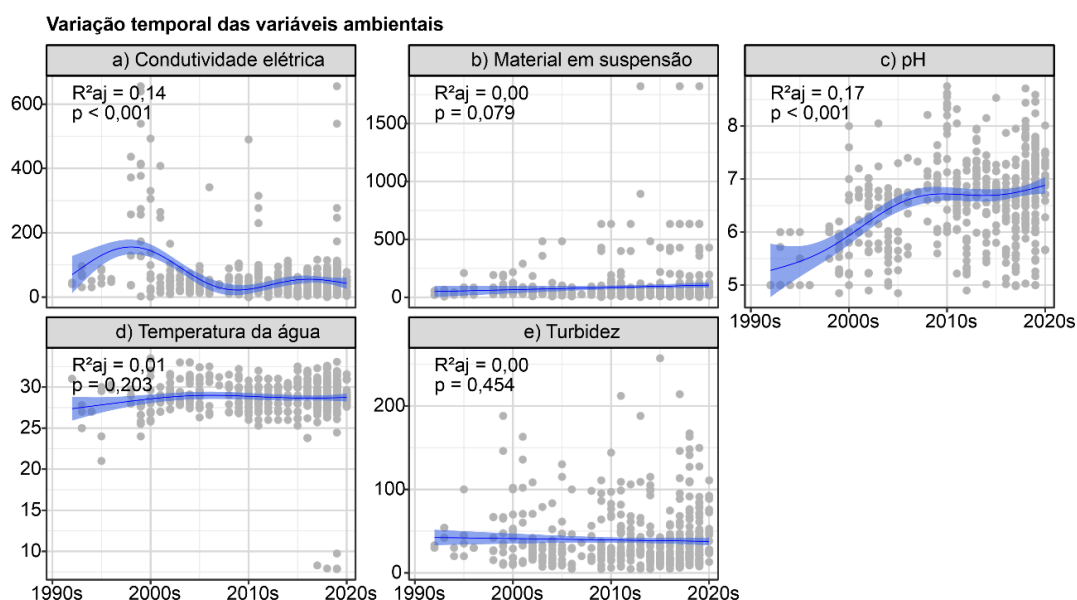
Variável	Alto	Médio	Baixo
pH	6,16 ± 0,76	6,72 ± 0,90	6,97 ± 0,93
Turbidez (NTU)	28,86 ± 28,71	40,62 ± 39,17	55,02 ± 62,32
Condutividade elétrica (µS cm ⁻¹)	31,12 ± 59,34	74,62 ± 117,76	86,53 ± 146,85
Temperatura (°C)	27,66 ± 1,33	28,85 ± 1,37	29,79 ± 1,73
Material suspenso (mg L ⁻¹)	97,91 ± 289,67	102,39 ± 255,67	112,39 ± 238,29

Variável	1990s	2000s	2010s	2020s
pH	5,53 ± 0,44	6,34 ± 0,72	6,79 ± 0,99	7,02 ± 0,74
Turbidez (NTU)	57,84 ± 64,86	39,59 ± 42,43	42,69 ± 55,61	48,88 ± 34,57
Condutividade elétrica (µS cm ⁻¹)	189,82 ± 190,86	70,91 ± 133,19	57,25 ± 112,23	63,47 ± 99,22
Temperatura (°C)	27,48 ± 2,16	29,32 ± 1,92	28,97 ± 1,67	28,83 ± 1,58
Material suspenso (mg L ⁻¹)	65,35 ± 55,63	68,19 ± 101,61	129,16 ± 327,54	86,10 ± 127,09

5.5 Tendências Temporais da Qualidade da Água

As tendências temporais avaliadas por meio de modelos aditivos generalizados (GAMs) revelaram padrões distintos entre as variáveis ambientais analisadas (Fig. 6; Tabela 5). A condutividade elétrica apresentou tendência temporal significativa e não linear ao longo da série histórica (Fig. 6a; $R^2_{aj} = 0,14$; $p < 0,001$). De forma semelhante, o pH também exibiu variação temporal significativa, com comportamento não linear ao longo das décadas (Fig. 6c; $R^2_{aj} = 0,17$; $p < 0,001$).

Figura 6. Variação temporal das variáveis ambientais ao longo das décadas. Os pontos representam os valores observados e a linha azul corresponde ao ajuste do modelo aditivo generalizado (GAM), com banda sombreada indicando o intervalo de confiança. Os valores de R^2 ajustado e p-valor referem-se ao termo suavizado do modelo ($s(ano)$).



Fonte: Autoral

Em contraste, material em suspensão (Fig. 6b; $R^2_{aj} = 0,00$; $p = 0,079$), temperatura da água (Fig. 6d; $R^2_{aj} = 0,01$; $p = 0,203$) e turbidez (Fig. 6e; $R^2_{aj} = 0,00$; $p = 0,454$) não apresentaram tendências temporais estatisticamente significativas. Esses resultados indicam que, entre as variáveis avaliadas, apenas a condutividade elétrica e o pH mostraram mudanças temporais consistentes ao longo do período analisado. Os diagnósticos completos dos modelos, incluindo graus de liberdade efetivos (edf), estatísticas F, R^2 ajustado e valores de p, estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados dos modelos aditivos generalizados (GAMs) ajustados para avaliar a variação temporal das variáveis ambientais.

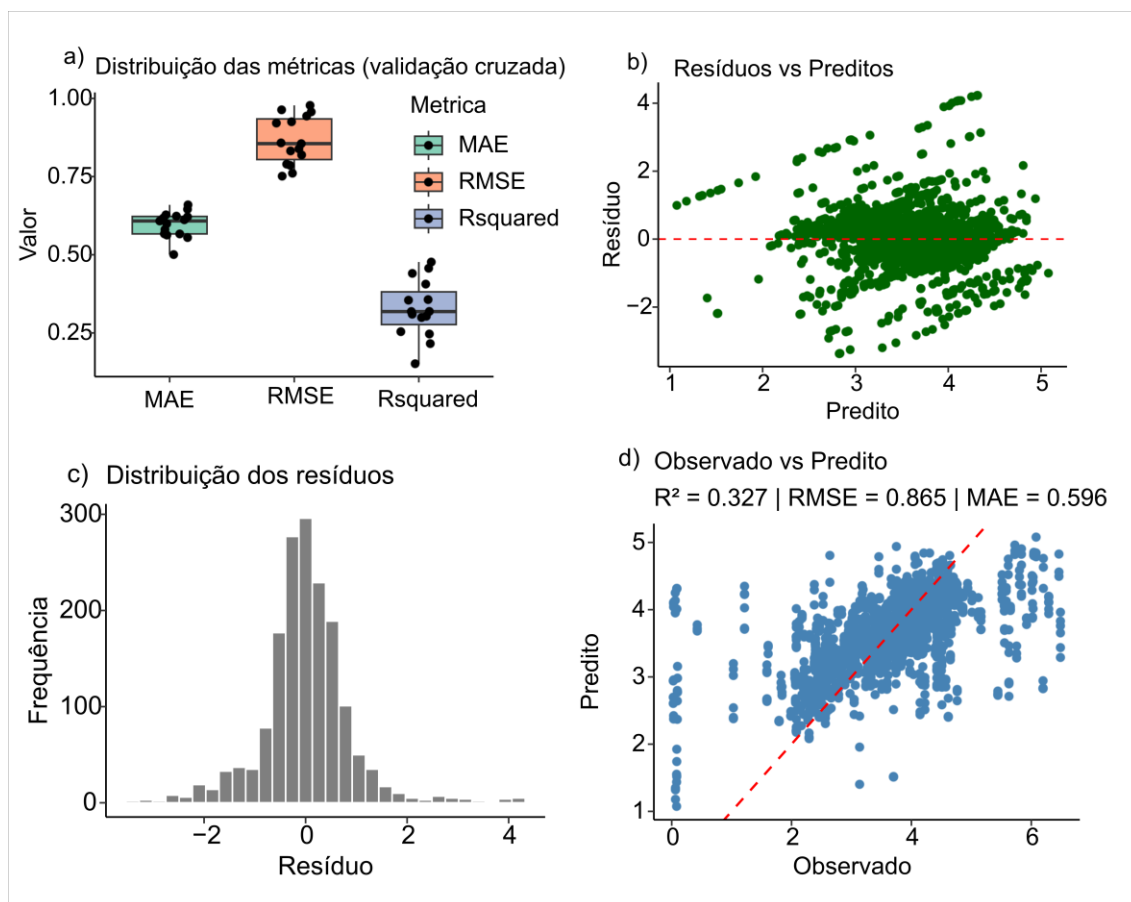
Variável	EDF	F	R^2 ajustado	p-valor
Condutividade elétrica	3,86	21,50	0,14	< 0,001
Material em suspensão	1,00	3,09	0,00	0,079
pH	3,45	26,00	0,17	< 0,001
Temperatura da água	2,52	1,49	0,00	0,203
Turbidez	1,00	0,56	0,00	0,454

5.6 Modelagem preditiva (Random Forest)

O modelo Random Forest apresentou desempenho moderado $R^2 = 0,327$, $RMSE = 0,865$, $MAE = 0,596$ (Figura 7a) na predição da condutividade elétrica (log-transformada), utilizada como indicador de intrusão salina. Os resíduos apresentaram média próxima de zero, porém com variância crescente em função dos valores preditos (Figura 7b), indicando heterocedasticidade.

O histograma dos resíduos (Figura 7c) apresentou distribuição aproximadamente normal, com leve assimetria positiva e uma baixa variabilidade das métricas entre reamostragens evidenciou a estabilidade do modelo. A relação entre valores observados e preditos (Figura 7d) evidenciou uma associação positiva consistente, com tendência geral próxima à linha 1:1, indicando que o modelo foi capaz de capturar o padrão global dos dados.

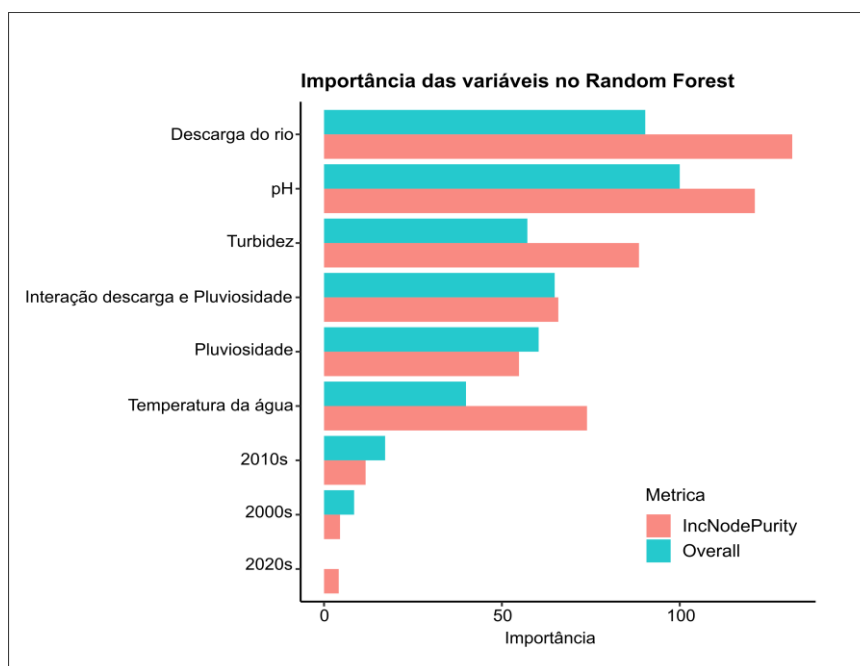
Figura 7. Desempenho do modelo Random Forest: (a) métricas de validação cruzada; (b) resíduos vs. preditos; (c) distribuição dos resíduos; (d) observado vs. predito.



Fonte: Autoral

A análise de importância das variáveis no modelo Random Forest evidenciou que o pH foi o principal preditor da condutividade elétrica, apresentando a maior contribuição relativa (Overall = 100%; %IncMSE = 26,58; IncNodePurity = 121,11). Em seguida, destacou-se a vazão (log-transformada), que também exerceu forte influência sobre a variável resposta (Overall = 90,30%; %IncMSE = 24,32; IncNodePurity = 131,62), indicando o papel dominante dos processos hidrológicos no controle da dinâmica observada (Figura 8).

Figura 8. Importância das variáveis no modelo Random Forest, comparando as métricas *Overall* (baseada na permutação) e *IncNodePurity* (baseada na redução da impureza dos nós).



Fonte: Autoral

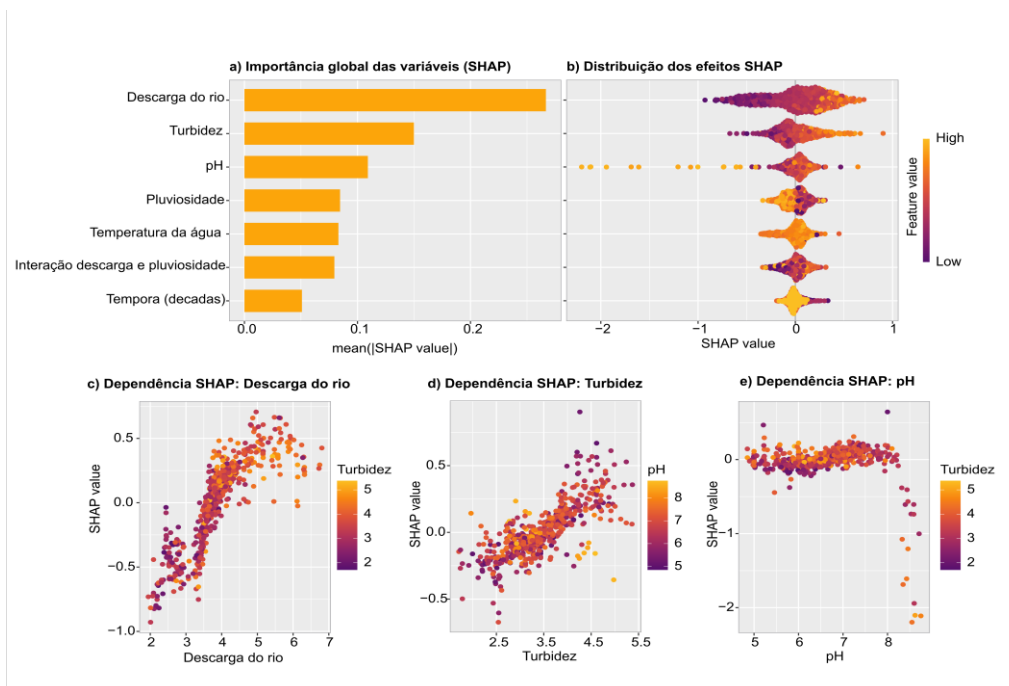
A interação entre vazão e pluviosidade apresentou contribuição relevante (Overall = 64,84%; %IncMSE = 18,39; IncNodePurity = 65,86), sugerindo que a resposta do sistema depende não apenas das variáveis isoladas, mas também da combinação entre os fluxos hidrológicos. A pluviosidade (Overall = 60,33%; %IncMSE = 17,34; IncNodePurity = 54,81) e a turbidez (Overall = 57,16%; %IncMSE = 16,60; IncNodePurity = 88,54) também apresentaram elevada importância, refletindo a influência conjunta de entrada de água e transporte de material particulado na variabilidade da condutividade elétrica.

A temperatura da amostra apresentou contribuição intermediária (Overall = 39,90%; %IncMSE = 12,58; IncNodePurity = 73,93), indicando um papel secundário, porém ainda relevante. Em contraste, as variáveis associadas à escala temporal (décadas) apresentaram baixa influência no modelo, com destaque para a década de 2010 (Overall = 17,17%), seguida pela década de 2000 (Overall = 8,45%), enquanto a década de 2020 não apresentou contribuição significativa (Overall = 0%).

5.7 Modelo interpretativo (SHAP)

A análise de importância global baseada nos valores SHAP (Figura 9a) indicou que a descarga do rio (vazão log-transformada) foi a variável com maior contribuição média absoluta para as predições do modelo, com valor em torno de 0,25, seguida por turbidez (~0,15) e pH (~0,12). As demais variáveis apresentaram influência menor, com valores inferiores a 0,10, destacando-se pluviosidade, temperatura da água e a interação entre descarga do rio e pluviosidade. A variável temporal (décadas) apresentou a menor contribuição (~0,04), indicando baixa relevância preditiva no conjunto analisado. Embora as métricas internas do Random Forest tenham apontado o pH como principal preditor na análise de importância convencional, a decomposição por SHAP destacou a descarga do rio como variável com maior contribuição média para as predições, evidenciando que diferentes abordagens de interpretabilidade capturam dimensões complementares da relevância dos preditores.

Figura 9. Interpretação do modelo Random Forest utilizando valores SHAP. (a) Importância global das variáveis, expressa pela média do valor absoluto dos SHAP. (b) Gráfico beeswarm mostrando a distribuição dos efeitos SHAP e a direção da influência das variáveis sobre a condutividade elétrica, com a escala de cores representando valores baixos (roxo) a altos (amarelo). (c–e) Gráficos de dependência SHAP para as variáveis mais relevantes: (c) descarga do rio; (d) turbidez; e (e) pH.



Fonte: Autoral

O gráfico beeswarm (Figura 9b) evidenciou a direção e a magnitude dos efeitos das variáveis sobre a resposta. A descarga do rio apresentou padrão predominantemente positivo, com valores mais elevados associados, em média, a contribuições positivas para a condutividade elétrica prevista, enquanto valores mais baixos tenderam a produzir efeitos negativos. A turbidez também mostrou tendência positiva, embora com maior dispersão dos valores SHAP, sugerindo maior sensibilidade a interações com outros preditores e à heterogeneidade interna do sistema. O pH, por sua vez, apresentou distribuição assimétrica dos efeitos, indicando comportamento não linear e resposta mais complexa ao longo de seu gradiente.

Os gráficos de dependência SHAP (Figura 9c–e) reforçaram a presença de relações não lineares e de possíveis limiares de resposta. Para a descarga do rio (Figura 9c), observou-se uma zona de transição entre aproximadamente 3,2 e 3,5, abaixo da qual os valores SHAP foram majoritariamente negativos ($\approx -1,0$ a $-0,3$), tornando-se positivos acima de 4,0 e alcançando cerca de 0,7. Para a turbidez (Figura 9d), verificou-se tendência crescente, com valores inferiores a 3,0 associados a efeitos negativos ou próximos de zero e valores superiores a 4,0 relacionados a contribuições positivas de até 0,6, ainda que com maior dispersão. O pH (Figura 9e) apresentou o padrão mais acentuadamente não linear, com valores entre 6,0 e 7,2 próximos da neutralidade e valores superiores a 7,5 associados a contribuições negativas intensas, podendo atingir cerca de -2,0. Em conjunto, esses resultados mostram que a resposta da condutividade elétrica no setor inferior do rio

Itapecuru depende de interações complexas entre controles hidrológicos e físico-químicos, não sendo adequadamente descrita por relações lineares simples.

Esse padrão positivo da vazão nos valores SHAP deve ser interpretado com cautela e não deve ser entendido como evidência direta de que maior descarga fluvial causa aumento da salinização. Do ponto de vista hidrológico, espera-se que o aumento da vazão favoreça a diluição e reduza a influência salina no baixo curso. Entretanto, no modelo Random Forest, a vazão atua de forma condicionada pelas demais variáveis, incluindo turbidez, pH, pluviosidade, temperatura da água, década e a interação entre vazão e pluviosidade. Assim, o efeito SHAP representa a contribuição média da vazão para a predição em combinações específicas de covariáveis, e não um coeficiente causal isolado.

Alguns fatores podem explicar esse comportamento aparentemente contraintuitivo. Primeiro, a vazão foi log-transformada, o que comprime valores extremos e altera a leitura das diferenças entre faixas elevadas de descarga. Segundo, parte dos eventos de maior vazão pode estar associada a maior conectividade hidrossedimentológica, ressuspensão e transporte de sólidos dissolvidos ou em suspensão, condição compatível com a contribuição positiva observada para a turbidez. Terceiro, a base integra diferentes trechos, décadas e períodos sazonais, de modo que valores elevados de vazão podem ocorrer em contextos nos quais a condutividade já era influenciada por mineralização, aporte de materiais dissolvidos ou efeitos estuarinos residuais. Quarto, como o Random Forest captura interações não lineares, o sinal positivo da vazão pode refletir colinearidade parcial, interação com turbidez e pluviosidade ou limitação do próprio modelo diante da heterogeneidade temporal e espacial da série.

5.8 Cenários prospectivos de risco de salinização

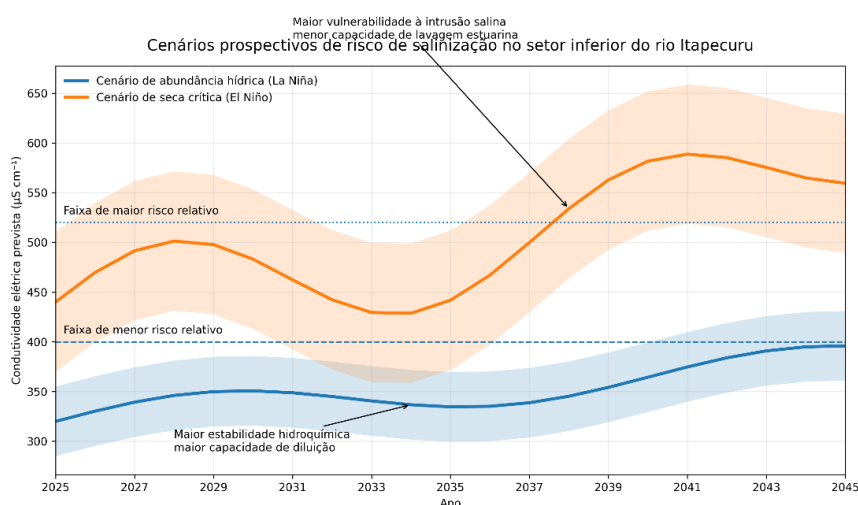
A projeção dos cenários de risco de salinização para o horizonte temporal de 2025–2045 foi estruturada a partir da combinação de caminhos evolutivos das forçantes hidroclimatológicas locais e globais, utilizando a linha de base histórica (1999–2024) como balizador de calibração. Foram delimitados três cenários operacionais para o algoritmo Random Forest: (i) *Cenário Otimista*, parametrizado pelo incremento de 10% na pluviosidade média e dominância de fases negativas ou neutras do índice MEI (La Niña/Neutralidade); (ii) *Cenário de Persistência (Tendência)*, que replica as taxas médias de redução de vazão e recorrência de secas observadas na última década; e (iii) *Cenário Crítico (Pessimista)*, configurado sob a premissa de redução de 15% na descarga fluvial

do rio Itapecuru e aumento na frequência e intensidade de anomalias térmicas positivas associadas ao ENSO (fases persistentes de El Niño Forte).

As faixas de incerteza atreladas a cada trajetória prospectiva foram calculadas por meio da extração dos intervalos de confiança estatísticos ($\alpha = 0,05$) derivados da variância das previsões do conjunto de árvores de decisão (*ensemble*) do modelo Random Forest. Esse procedimento permitiu quantificar a amplitude de dispersão dos erros ponto a ponto ao longo dos anos projetados, delimitando as fronteiras superior e inferior de flutuação da condutividade elétrica para cada cenário induzido, conforme apresentado na Figura 10.

Em que pese a consistência matemática das projeções, ressalta-se que as trajetórias simuladas não devem, sob hipótese alguma, ser interpretadas sob uma óptica determinista de alta precisão. Essas curvas constituem estimativas condicionais de sensibilidade ambiental e cenários de risco prováveis, cujas limitações associadas decorrem da impossibilidade de prever quebras estruturais inéditas no sistema climatológico global, mudanças abruptas nos padrões de uso e ocupação do solo da bacia, ou a implementação de novas infraestruturas de regularização hídrica a montante.

Figura 10. Cenários prospectivos de risco de salinização no setor inferior do rio Itapecuru entre 2025 e 2045, sob condições de abundância hídrica (La Niña) e seca crítica (El Niño). As linhas representam a condutividade elétrica prevista e as faixas sombreadas indicam a incerteza das projeções.



Fonte: Autoral

Em conjunto, os dois cenários sintetizam extremos plausíveis de funcionamento hidroclimático do sistema e evidenciam como alterações no balanço entre aporte fluvial e forçantes climáticas de grande escala podem modificar o risco de salinização no setor inferior da bacia. A Figura 10 apresenta a representação gráfica desses cenários, permitindo comparar o comportamento prospectivo da condutividade elétrica sob condições de abundância hídrica e seca crítica, bem como discutir suas implicações para o monitoramento preventivo e para a gestão adaptativa dos recursos hídricos.

6. DISCUSSÃO

6.1 Regime hidrológico, variabilidade climática e vulnerabilidade do baixo Itapecuru

Os resultados desta dissertação mostram que a dinâmica hidroambiental do baixo rio Itapecuru é fortemente controlada pela variabilidade do regime hidrológico, expressa principalmente pelas oscilações de pluviosidade e vazão ao longo da série temporal analisada. Em rios tropicais e sistemas flúvio-estuarinos, a descarga fluvial atua como um dos principais mecanismos reguladores da intrusão salina, da capacidade de diluição de solutos e partículas, do tempo de residência da água e da estabilidade hidroquímica do sistema. Nesse contexto, a variação interanual observada no Itapecuru reforça que alterações no balanço entre aporte continental e influência estuarina tendem a repercutir diretamente sobre a qualidade da água, sobretudo no setor inferior da bacia, onde o sistema se mostra mais sensível à redução do fluxo doce (LEE et al., 2025; KHALIL et al., 2025).

A associação entre pluviosidade, vazão e MEI sugere que a variabilidade hidroclimática regional deve ser interpretada em chave multiescalar, e não apenas como reflexo linear das fases do ENSO. Em escala sul-americana, Petry, Fan e Wood (2025) demonstraram que o ENSO altera a probabilidade de extremos hidrológicos em diferentes regiões do continente, mas a resposta observada depende da posição geográfica, da estação do ano e da interação com condicionantes locais. Assim, no caso do Itapecuru, o ENSO parece funcionar menos como explicação isolada e mais como modulador climático de um sistema já condicionado pela sazonalidade pluviométrica regional e por pressões antrópicas acumuladas ao longo da bacia. Essa interpretação é coerente com a literatura sobre rios tropicais, segundo a qual a resposta hidrológica a anomalias climáticas globais é frequentemente mediada por fatores geomorfológicos, hidrodinâmicos e de uso do solo (PETRY; FAN; WOOD, 2025).

No baixo Itapecuru, essa relação entre variabilidade hidroclimática e vulnerabilidade torna-se especialmente relevante porque se trata de uma bacia estratégica para o abastecimento público. Isso significa que a redução da vazão não representa apenas uma mudança hidrológica, mas uma condição potencial de risco para a estabilidade da qualidade da água, para a intensificação da influência estuarina e para a segurança operacional do sistema de captação. A própria ANA tem destacado que a gestão dos recursos hídricos no Brasil exige articulação entre quantidade, qualidade, monitoramento e prevenção de eventos críticos, especialmente em bacias sob múltiplos usos e sob crescente pressão ambiental. Desse modo, os resultados desta dissertação reforçam que a vulnerabilidade do Itapecuru é simultaneamente climática, hidrológica e antrópica, exigindo leitura integrada desses componentes no planejamento da gestão (ANA, 2024; ANA, 2025).

6.2 Gradiente longitudinal da qualidade da água e intensificação dos sinais de salinização

O gradiente espacial observado ao longo do rio, caracterizado pelo aumento da condutividade elétrica, da temperatura da água e do pH em direção ao baixo curso, indica a existência de uma reorganização hidroquímica longitudinal associada ao fortalecimento da influência estuarina. Em sistemas tropicais costeiros, esse padrão é recorrente, pois a transição montante-jusante tende a refletir mudanças progressivas no balanço entre descarga fluvial, mistura por maré, salinidade, material particulado e composição química da água. No caso do Itapecuru, a elevação da condutividade elétrica no setor inferior reforça a interpretação de que a salinização constitui um dos principais sinais de vulnerabilidade ambiental e operacional do sistema, sobretudo sob condições de menor disponibilidade hídrica (LEE et al., 2025; KHALIL et al., 2025).

Esse comportamento é coerente com estudos conduzidos em estuários tropicais do norte do Brasil, onde a salinidade e variáveis correlatas estruturam fortemente a heterogeneidade ambiental. Em estuários amazônicos e macromareais, o setor inferior costuma concentrar maior influência marinha, maior instabilidade físico-química e maior sensibilidade a perturbações antrópicas. No estuário do rio Anil, por exemplo, Sá et al. (2022) mostraram que a porção inferior foi a mais suscetível à intensificação do estado trófico, com forte papel da salinidade e de outros estressores ambientais. De modo semelhante, Costa et al. (2021) e da Cruz et al. (2023) demonstraram que a heterogeneidade espacial em sistemas tropicais do norte brasileiro está fortemente

associada a gradientes de salinidade, turbidez, sólidos em suspensão e disponibilidade de nutrientes, o que reforça a interpretação do baixo Itapecuru como zona de convergência de estressores físicos e hidroquímicos (SÁ et al., 2022; COSTA et al., 2021; DA CRUZ et al., 2023).

A turbidez e o material em suspensão também contribuíram para evidenciar essa diferenciação espacial. Em sistemas estuarinos, esses parâmetros costumam responder à interação entre descarga do rio, energia de maré, remobilização de sedimentos e mistura entre águas continentais e marinhas. Assim, o aumento desses sinais no setor inferior do Itapecuru não deve ser interpretado apenas como reflexo do transporte de partículas, mas como expressão de um ambiente mais dinâmico, mais sujeito à ressuspensão e menos estável do ponto de vista hidroquímico. Estudos em estuários amazônicos apontam comportamento semelhante, com maiores valores de salinidade, pH e influência marinha próximos à foz, além de forte sensibilidade sazonal na distribuição de nutrientes e partículas (MONTEIRO et al., 2015; SANTOS et al., 2023).

6.3 Mudanças temporais da qualidade da água e implicações hidroambientais

As diferenças observadas entre décadas e as tendências temporais detectadas pelos GAMs indicam que parte da variabilidade da qualidade da água no Itapecuru não é apenas sazonal, mas também interdecadal. Esse resultado é relevante porque sugere que o sistema vem passando por alterações graduais em sua assinatura hidroquímica, particularmente no que se refere à condutividade elétrica e ao pH. Em rios tropicais e estuários sob influência antrópica, esse tipo de mudança costuma refletir a combinação entre variação hidrológica, reorganização da mistura estuarina, alterações no uso da bacia e crescente pressão sobre a qualidade da água (LEE et al., 2025; ANA, 2024).

A tendência temporal da condutividade elétrica é especialmente importante porque essa variável integra, de forma indireta, alterações na mineralização da água e no fortalecimento do sinal de salinização. Quando essa tendência é interpretada em conjunto com as diferenças espaciais entre cursos, o quadro que emerge é o de um sistema em que o setor inferior se torna progressivamente mais sensível à redução da descarga fluvial. Em termos hidroambientais, isso implica maior probabilidade de episódios críticos em períodos secos, maior instabilidade da qualidade da água bruta e maior vulnerabilidade para usos dependentes de água doce. Em escala global, Lee et al. (2025) mostram que o avanço da intrusão salina tende a se intensificar em grande parte dos estuários analisados

sob cenários futuros, o que torna ainda mais importante a identificação precoce de sinais locais de vulnerabilidade.

O comportamento temporal do pH também merece interpretação cautelosa. Em estuários tropicais, o pH varia em resposta à mistura entre águas continentais e marinhas, à composição iônica, aos processos biogeoquímicos e à atividade biológica. Assim, a tendência detectada no Itapecuru provavelmente reflete uma resposta integrada do sistema, e não uma alteração isolada. Monteiro et al. (2015), ao estudarem um estuário amazônico, registraram variação do pH de condições ácidas a alcalinas, com máximos próximos à foz em função da maior influência marinha. Esse comportamento é compatível com a leitura de que mudanças temporais no pH do Itapecuru acompanham a reorganização hidroquímica do setor inferior diante da variabilidade hidrológica e da intensificação da influência estuarina (MONTEIRO et al., 2015).

6.4 Potencial e limitações da modelagem preditiva na avaliação do risco de salinização

A modelagem por Random Forest mostrou que variáveis como pH, vazão, pluviosidade, turbidez e a interação entre descarga do rio e chuva desempenham papel relevante na explicação da variabilidade da condutividade elétrica. Esse resultado é consistente com a natureza processual da salinização em sistemas flúvio-estuarinos, nos quais a resposta hidroquímica depende de relações não lineares entre hidrologia, mistura, composição da água e condições climáticas. Em sistemas de qualidade da água, modelos de aprendizado de máquina têm sido cada vez mais utilizados justamente por sua capacidade de capturar interações complexas entre variáveis e ampliar o potencial preditivo em contextos onde abordagens lineares tendem a simplificar excessivamente o comportamento do sistema (WANG et al., 2022; HE et al., 2024).

Apesar disso, os resultados desta dissertação também mostram que a modelagem deve ser interpretada com prudência. O desempenho moderado do modelo e a presença de heterocedasticidade nos resíduos indicam que, embora o algoritmo tenha sido útil para identificar padrões e hierarquizar preditores, sua capacidade explicativa permanece parcial. Essa limitação não diminui a utilidade do modelo; ao contrário, ajuda a situá-lo corretamente como ferramenta de apoio à compreensão e à antecipação de risco, e não como mecanismo de previsão determinística de alta precisão. Enquanto o modelo exhibe elevada precisão e resíduos confinados próximos a zero na faixa de predição de baixa salinidade (valores log-transformados inferiores a 3,5, equivalentes às condições de

normalidade e dominadas pelo fluxo de água doce), a margem de incerteza expande-se criticamente nas faixas superiores de predição, sobretudo ao tentar estimar valores que superam o limiar do percentil 85 ($> P85$) estabelecido para o cenário de seca crítica. Sob a perspectiva física do baixo curso do rio Itapecuru, essa perda localizada de desempenho nas faixas mais altas decorre da natureza estocástica e altamente dinâmica da interface flúvio-estuarina. Nesses limiares superiores, a hidrodinâmica local passa a sofrer forte indução dos ciclos de maré e de intrusões salinas transientes.

Como essas flutuações ocorrem em escalas de curto prazo e não estão plenamente representadas nas preditoras discretas de macroescala e climatologia mensal utilizadas, o algoritmo encontra limites para estabilizar suas estimativas nessas faixas.

Em sistemas tropicais complexos, especialmente sob influência de maré, forçantes climáticas e heterogeneidade espacial, esse tipo de limitação é esperado, pois a variabilidade observada raramente é plenamente explicada por um conjunto restrito de variáveis ambientais (Wang et al., 2022; Lokman et al., 2025).

A interpretação por SHAP reforça o valor aplicado dessa abordagem ao mostrar que a relevância das variáveis não se restringe à ordem de importância global, mas também à direção e à magnitude dos seus efeitos ao longo dos gradientes observados. Essa possibilidade de interpretar o modelo de forma mais transparente é particularmente útil para a gestão de recursos hídricos, pois permite identificar condições críticas de resposta e potenciais limiares de risco. No caso do Itapecuru, os resultados sugerem que a vulnerabilidade à salinização depende de combinações específicas de vazão, chuva e estado hidroquímico do sistema, o que oferece base mais consistente para monitoramento preventivo e para a construção de cenários de risco (WANG et al., 2022; HE et al., 2024).

A aparente contribuição positiva da vazão nas predições deve, portanto, ser entendida como resultado condicionado do modelo, e não como inversão do mecanismo hidrológico esperado. Em sistemas flúvio-estuarinos, maior vazão tende a reduzir a intrusão salina por diluição e maior descarga continental; contudo, em bases históricas heterogêneas, a vazão também pode estar associada ao transporte de material dissolvido e particulado, à turbidez e a diferenças entre trechos e períodos. Essa distinção é fundamental para evitar uma interpretação causal simplista dos valores SHAP e para posicionar o modelo como ferramenta de apoio à decisão, dependente de validação hidrológica e operacional.

6.5 Implicações para a gestão de recursos hídricos e segurança do abastecimento

Do ponto de vista aplicado, os resultados sustentam que o baixo rio Itapecuru deve ser tratado como setor prioritário para monitoramento e gestão adaptativa. A combinação entre variabilidade hidrológica, tendências temporais em variáveis hidroquímicas e fortalecimento dos sinais de salinização torna esse trecho particularmente sensível para o abastecimento público. Em termos de gestão, isso reforça a necessidade de integrar monitoramento de vazão, pluviosidade e qualidade da água, especialmente em períodos de estiagem e em contextos de maior instabilidade climática. Os relatórios de conjuntura da ANA reiteram que a segurança hídrica no Brasil depende da articulação entre informação, monitoramento, instrumentos de gestão e capacidade de resposta a eventos críticos, o que se aplica diretamente ao caso do Itapecuru (ANA, 2024; ANA, 2025).

Os cenários prospectivos desenvolvidos nesta dissertação, embora exploratórios, mostram-se úteis por traduzirem a vulnerabilidade hidroambiental do sistema em termos operacionais. Em bacias estratégicas, a distinção entre cenários de maior disponibilidade hídrica e de seca crítica pode apoiar a definição de limiares de alerta, rotinas de acompanhamento e prioridades de gestão. Em escala internacional, o avanço da intrusão salina vem sendo reconhecido como risco crescente para água potável, agricultura e integridade ecológica, o que torna ainda mais relevantes os estudos locais capazes de antecipar impactos e subsidiar respostas regionais. Assim, a principal contribuição desta dissertação está em demonstrar que o risco de salinização no baixo Itapecuru não deve ser tratado como hipótese remota, mas como componente concreto da gestão da bacia e da segurança do abastecimento (LEE et al., 2025; KHALIL et al., 2025).

Por fim, o conjunto dos resultados mostra que a vulnerabilidade do Itapecuru não pode ser diagnosticada adequadamente por indicadores isolados ou por campanhas pontuais. O sistema exige leitura integrada de clima, hidrologia, qualidade da água e sinais de salinização, com atenção especial ao setor inferior da bacia. Em termos práticos, isso aponta para a necessidade de monitoramento contínuo da condutividade elétrica e da vazão, incorporação de ferramentas preditivas como suporte à decisão e fortalecimento de estratégias de gestão adaptativa capazes de responder a cenários de maior risco hidroambiental. Em uma perspectiva compatível com o ProfÁgua, essa integração entre

diagnóstico, predição e gestão representa precisamente o tipo de contribuição aplicada que uma dissertação profissional deve oferecer (ANA, 2024; ANA, 2025).

6.6 Produto técnico como desdobramento aplicado da dissertação

Como desdobramento aplicado dos resultados obtidos, esta dissertação propõe o produto técnico intitulado SISAL-Itapecuru: Sistema de Alerta para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru, concebido como instrumento de apoio ao monitoramento, à antecipação de risco e à tomada de decisão no contexto da gestão da qualidade da água e da segurança do abastecimento. O produto foi estruturado para converter os principais achados do estudo — especialmente a relevância da condutividade elétrica como indicador hidroquímico associado à salinização, a influência da vazão e da pluviosidade sobre a variabilidade do sistema e a utilidade da modelagem preditiva — em uma ferramenta operacional voltada à atuação de órgãos gestores e operadores do abastecimento.

A proposição desse sistema reforça o caráter aplicado da dissertação, uma vez que avança do diagnóstico hidroambiental para uma estrutura de resposta orientada por evidências. O produto inclui arquitetura baseada em dados ambientais, regras de classificação de risco em níveis de alerta, boletins operacionais, rotinas de validação retrospectiva e definição de responsabilidades entre instituições estratégicas, como CAEMA e SEMA. Dessa forma, ele materializa, em linguagem de gestão, os resultados que indicaram maior sensibilidade do setor inferior do rio Itapecuru à redução da descarga fluvial, ao fortalecimento dos sinais de salinização e à instabilidade da qualidade da água em cenários hidroclimáticos desfavoráveis.

Além disso, o produto técnico dialoga diretamente com a proposta metodológica desenvolvida na dissertação ao incorporar uma lógica de monitoramento orientado por limiares, suporte preditivo e rastreabilidade das decisões. Em vez de permanecer apenas no campo interpretativo, a pesquisa passa a oferecer um mecanismo potencialmente utilizável para intensificar a vigilância em períodos críticos, organizar respostas operacionais e fortalecer a gestão adaptativa em uma bacia estratégica para o abastecimento público. Nesse sentido, o produto técnico não deve ser entendido como elemento acessório, mas como uma das principais contribuições práticas desta dissertação para o campo da gestão e regulação de recursos hídricos.

6.7 Limitações e perspectivas futuras

A despeito das contribuições diagnósticas e preditivas estabelecidas nesta pesquisa, o mapeamento da vulnerabilidade hidroambiental na bacia do rio Itapecuru esbarra em fronteiras observacionais que delimitam o alcance dos modelos gerados e pavimentam o caminho para investigações subsequentes. A principal limitação reside na escala temporal e na natureza discreta das campanhas de amostragem histórica disponíveis nas bases oficiais. A ausência de um sistema de monitoramento contínuo e em tempo real impede que os algoritmos capturem fenômenos dinâmicos transientes de curto prazo. Dentre esses processos, destaca-se o efeito da maré estuarina, cuja hidrodinâmica impõe variações cíclicas diárias na intrusão salina que não são plenamente integradas por leituras mensais ou sazonais acumuladas.

Adicionalmente, embora os modelos estatísticos e computacionais tenham apresentado elevado desempenho estatístico interno, os resultados carecem de uma validação independente com matrizes de dados inéditas, coletadas fora do horizonte temporal abrangido (1999–2024), para testar sua real capacidade de generalização cega frente ao futuro. Geograficamente, verifica-se a necessidade de estabelecer uma malha amostral com maior resolução espacial e temporal no setor inferior da bacia, trecho onde a complexidade da zona de mistura estuarina exige um adensamento de sensores hidroambientais para mapear as frentes de salinização com precisão micrométrica.

Como desdobramento prático e aplicado deste estudo, as perspectivas futuras concentram-se na transição do SISAL-Itapecuru de um protótipo acadêmico para uma plataforma de suporte à decisão institucional. Para tanto, faz-se indispensável promover uma calibração conjunta e iterativa dos limiares de alerta do sistema junto aos corpos técnicos da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA) e da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Essa articulação institucional permitirá alinhar as previsões matemáticas de condutividade elétrica às janelas de manobra operacional da captação e às políticas estaduais de contingência hídrica, consolidando o nexos entre modelagem preditiva e governança ambiental efetiva no Estado.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2025 – Relatório Pleno. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-2025-primeiro-totalmente-digital-e-acessivel>. Acesso em: 20 abr. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe anual 2024. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/106160. Acesso em: 20 abr. 2026.

COSTA, Denise dos Santos et al. Spatial and seasonal variation in physicochemical characteristics and phytoplankton in an estuary of a tropical delta system. *Regional Studies in Marine Science*, [S. l.], v. 44, art. 101730, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101746>

CRUZ, Quedyane Silva da et al. Environmental heterogeneity of a tropical river-to-sea continuum and its relationship with structure and phytoplankton dynamics – Lençóis Maranhenses National Park. *Marine Environmental Research*, [S. l.], v. 187, art. 105950, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.105950>

HE, Min et al. Recent progress on surface water quality models utilizing machine learning. *Water, Basel*, v. 16, n. 24, art. 3616, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16243616>

HYNDMAN, Rob J.; ATHANASOPOULOS, George. *Forecasting: principles and practice*. 3. ed. Melbourne: OTexts, 2021. E-book. Disponível em: <https://otexts.com/fpp3/>. Acesso em: 22 maio 2026.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Chapter 3: Oceans and Coastal Ecosystems and their Services.

KHALIL, Umer et al. Estuarine salinity intrusion and flushing time response to freshwater flows and tidal forcing under the constricted entrance. *Water, Basel*, v. 17, n. 5, art. 693, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17050693>

LEE, Jiyong et al. Global increases of salt intrusion in estuaries under future environmental conditions. *Nature Communications*, London, v. 16, art. 3444, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58783-6>

LOKMAN, Ahmad et al. A review of water quality forecasting and classification using machine learning approaches. *Water, Basel*, v. 17, n. 15, art. 2243, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17152243>

MONTEIRO, Simone Morais et al. Dinâmica sazonal de nutrientes em estuário amazônico. *Mercator*, Fortaleza, v. 14, n. 4, p. 151-162, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/tf4psGqmXKz4hTWT3X9wYTd/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

PAIVA, B. P.; SCHETTINI, C. A. Circulation and transport processes in a tidally forced salt-wedge estuary: The São Francisco river estuary, Northeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, [S. l.], v. 41, art. 101602, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101602>

PETRY, Irineu; FAN, Fernando Mainardi; WOOD, Andrew W. Observed streamflow data shows El Niño–Southern Oscillation increases likelihood of extreme events in South America.

Communications Earth & Environment, London, v. 6, art. 699, 2025. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02714-2>

ROBERTS, David R. et al. Cross-validation strategies for data with spatial, temporal, or phylogenetic dependence. *Ecography*, v. 40, n. 8, p. 913-929, 2017. DOI 10.1111/ecog.02881. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecog.02881>. Acesso em: 22 maio 2026.

SÁ, Ana Karoline Duarte dos Santos et al. Multiple stressors influencing the general eutrophication status of transitional waters of the Brazilian tropical coast: an approach utilizing the pressure-state-response (PSR) framework. *Regional Studies in Marine Science*, [S. l.], v. 54, art. 102469, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102282>

TOWNER, J. et al. Influence of ENSO and tropical Atlantic climate variability on flood characteristics in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, [S. l.], v. 25, n. 7, p. 3875-3895, 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3875-2021>

WANG, Shuo; PENG, Hui; LIANG, Shengkang. Prediction of estuarine water quality using interpretable machine learning approach. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 605, art. 127320, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127320>

APÊNDICES

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PROFÁGUA/UEMA

PRODUTO TÉCNICO

Proposta de desenvolvimento do Sistema de Alerta Operacional e Suporte à Decisão para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru (SISAL-Itapecuru)

Produto vinculado à dissertação

*“Mudança do regime hidrológico e degradação da qualidade da água na porção inferior da
bacia do rio Itapecuru (MA): evidências de vulnerabilidade climática e antrópica em um
sistema estratégico para a gestão de recursos hídricos”*

Autor	João Yuri da Silva Carneiro
Instituição	ProfÁgua/UEMA
Finalidade	Produto técnico para apoio à gestão do risco de intrusão salina
Série histórica de referência	1992–2024

7. PRODUTO TÉCNICO

7.1 Objetivo do produto e público-alvo

Este produto técnico propõe o desenvolvimento do Sistema de Alerta Operacional e Suporte à Decisão para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru (SISAL-Itapecuru), concebido para transformar os resultados da dissertação em uma ferramenta prática de monitoramento, classificação de risco e apoio à tomada de decisão.

A proposta utiliza a condutividade elétrica como indicador proxy de salinização e integra evidências hidroclimáticas, hidrológicas e físico-químicas com foco em reduzir vulnerabilidades do abastecimento, orientar respostas operacionais da CAEMA e fortalecer a atuação da SEMA no monitoramento e na gestão ambiental.

- Padronizar um protocolo de classificação de risco em formato de semáforo para episódios de salinização.
- Estruturar a emissão de boletins operacionais com recomendações acionáveis para captação e tratamento.
- Integrar o diagnóstico histórico da série 1992–2024 à modelagem preditiva para antecipar cenários críticos.
- Definir uma proposta de governança com responsabilidades básicas entre CAEMA e SEMA.

Público-alvo prioritário

CAEMA (operação e controle de qualidade), SEMA (monitoramento, fiscalização e gestão), além de atores de apoio como comitê de bacia, Defesa Civil, prefeituras e instituições parceiras.

7.2 Arquitetura do produto (dados → modelos → regras → comunicação)

O SISAL-Itapecuru é estruturado em seis módulos integrados e foi desenhado para operar mesmo sob restrição de dados em tempo real. A lógica do sistema privilegia o uso de informação periódica confiável, associada a rotinas claras de atualização e resposta.

Módulo	Descrição operacional
Módulo 1 – Dados (entrada)	Condutividade elétrica, STD, turbidez, pH, temperatura da água, oxigênio dissolvido, material em suspensão, vazão, precipitação e MEI/ENSO.
Módulo 2 – Tratamento e consistência	Padronização de unidades, checagem de valores extremos e dados ausentes, consolidação temporal e produção de séries compatíveis com a rotina operacional.
Módulo 3 – Modelos (núcleo analítico)	Diagnóstico estatístico da série 1992–2024 e modelagem preditiva para estimar a condutividade elétrica em janelas operacionais mensais ou quinzenais.

Módulo	Descrição operacional
Módulo 4 – Regras e classificação	Conversão dos valores observados e previstos em níveis de alerta (Verde, Amarelo e Vermelho), com critérios de confirmação e escalonamento.
Módulo 5 – Comunicação	Emissão de boletim operacional, sínteses técnicas para gestão e alertas institucionais quando os gatilhos forem atingidos.
Módulo 6 – Registro e auditoria	Armazenamento dos alertas, dados utilizados, decisões adotadas e justificativas técnicas para reavaliação do sistema.

7.3 Indicadores e limiares (definição metodológica do semáforo)

A condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) é proposta como indicador-chave do sistema, por apresentar elevada sensibilidade à entrada de água salobra e ampla viabilidade de medição em rotina de campo e laboratório. Como apoio à interpretação, também devem ser acompanhados STD, turbidez, pH, temperatura da água, oxigênio dissolvido, material em suspensão, vazão, precipitação acumulada e sinal ENSO/MEI.

Os limiares devem ser calculados a partir da distribuição histórica da série 1992–2024, por ponto de monitoramento ou por trecho, de forma a respeitar a heterogeneidade espacial do setor inferior do rio.

Nível	Faixa proposta	Interpretação
Verde	$\leq P60$	Condição usual; manutenção da rotina operacional.
Amarelo	P60–P85	Condição elevada; intensificação do acompanhamento e confirmação.
Vermelho	$> P85$	Condição crítica; acionamento do plano de contingência.

Critério de confirmação

Os níveis Amarelo e Vermelho devem, preferencialmente, ser confirmados por persistência em duas medições consecutivas ou por coerência com STD e com o contexto hidrológico do período.

7.4 Procedimento de operação (checklist por nível)

A proposta de operação do SISAL-Itapecuru é organizada em rotina operacional mínima e rotina operacional intensificada, conforme o nível de alerta identificado.

7.4.1 Nível Verde (Normalidade)

- Manter a rotina operacional de medição de condutividade elétrica e STD nos pontos definidos.
- Registrar data, hora, local, método e, quando possível, condição de maré.
- Atualizar a base institucional e compartilhar síntese técnica com a SEMA.

7.4.2 Nível Amarelo (Atenção)

- Repetir a medição no menor intervalo viável e intensificar temporariamente a frequência de monitoramento.
- Medir, no mínimo, condutividade elétrica, STD e turbidez.
- Executar o modelo preditivo para a janela operacional definida e preparar o plano de contingência.

7.4.3 Nível Vermelho (Crítico)

- Confirmar o evento com nova medição e registrar o episódio em sistema de auditoria.
- Acionar o plano de contingência para captação e tratamento, conforme normativo interno.
- Emitir boletim operacional crítico e ampliar a comunicação institucional.

7.5 Validação do produto

A validação do SISAL-Itapecuru deve ser demonstrada em dois níveis complementares: validação do modelo preditivo e validação do sistema de alerta.

- Avaliar o desempenho do modelo com métricas como RMSE e R^2 , reportando média e variabilidade em validação cruzada.
- Reconstruir retrospectivamente os níveis Verde, Amarelo e Vermelho com base na série 1992–2024 para verificar sensibilidade, especificidade e coerência com o contexto hidroclimático.
- Selecionar janelas temporais críticas para apresentação de estudos de caso com série observada, série prevista, nível de alerta e decisão operacional recomendada.

7.6 Plano de implementação

Considerando a limitação de dados em tempo real, a proposta de implementação privilegia rotinas periódicas simples, com possibilidade de intensificação quando os gatilhos de atenção ou criticidade forem acionados.

Fase	Atividades prioritárias
Fase 1 (0–3 meses)	Padronização de pontos, variáveis mínimas, planilha ou painel e cálculo dos limiares históricos.
Fase 2 (3–6 meses)	Implementação do modelo, boletim operacional e rotina mensal ou quinzenal.
Fase 3 (6–12 meses)	Operacionalização do semáforo e ajustes com base em lições aprendidas.
Fase 4 (12+ meses)	Expansão dos pontos e integração futura com dados automáticos, quando viável.

7.7 Considerações finais do produto

O SISAL-Itapecuru foi concebido como uma proposta de desenvolvimento de instrumento técnico de apoio à decisão, capaz de converter séries históricas e monitoramento periódico em um mecanismo prático de vigilância, classificação de risco e resposta ao avanço da salinização.

Ao combinar condutividade elétrica como indicador central, modelagem interpretável, rotina operacional, boletim operacional e plano de contingência, o produto fortalece o vínculo entre ciência aplicada, segurança hídrica e gestão adaptativa no setor inferior do rio Itapecuru.

APÊNDICE A — MODELO DE BOLETIM OPERACIONAL | NÍVEL VERDE (NORMALIDADE)

Sistema de Alerta Operacional e Suporte à Decisão para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru – SISAL-Itapecuru

Emissão	CAEMA – Operação/ETA	Ciência técnica	SEMA – Monitoramento e Gestão
Data de emissão	___ / ___ / ___	Período avaliado	___ / ___ / ___ a ___ / ___ / ___
Trecho/Ponto(s)	_____	Município	_____

NÍVEL VERDE – NORMALIDADE

A condição monitorada no período avaliado permanece dentro da faixa histórica usual do ponto ou trecho analisado. Não foram identificados sinais consistentes de intensificação do risco de intrusão salina no setor inferior do rio Itapecuru.

Indicadores de monitoramento

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Condutividade elétrica	_____	$\mu\text{S cm}^{-1}$	___ / ___ às _____	() campo () laboratório
STD	_____	mg L^{-1}	___ / ___ às _____	
Material em suspensão	_____	mg L^{-1}	___ / ___ às _____	
Turbidez	_____	NTU	___ / ___ às _____	
pH	_____	—	___ / ___ às _____	
Temperatura da água	_____	$^{\circ}\text{C}$	___ / ___ às _____	

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Oxigênio dissolvido	_____	mg L ⁻¹	____ / ____ às _____	
Temperatura do ar	_____	°C	____ / ____ às _____	
Vazão (quando disponível)	_____	m ³ s ⁻¹	____ / ____ às _____	
Pluviosidade acumulada	_____	mm	período: _____	
MEI / ENSO	_____	—	período: _____	

A condição monitorada no período avaliado permanece dentro da faixa considerada usual para o ponto ou trecho analisado. Não foram identificados sinais consistentes de intensificação do risco de intrusão salina no setor inferior do rio Itapecuru.

Tendência recente da condutividade elétrica: () estável () aumento leve () redução leve

Observações técnicas: _____

• **Recomendações**

- Manter a rotina operacional de monitoramento conforme o plano estabelecido.
- Registrar integralmente os metadados de coleta e análise.
- Verificar periodicamente a calibração e a integridade dos equipamentos.
- Atualizar a base de dados institucional e compartilhar síntese técnica entre CAEMA e SEMA.

Fonte: Elaboração própria, com base na proposta do SISAL-Itapecuru e na série histórica de referência (1992–2024).

Programação da próxima atualização**Próxima medição prevista:** ____ / ____ / ____**Próximo boletim operacional:** ____ / ____ / ____**Anexos:** () planilha de dados () gráfico de série temporal () laudo
laboratorial () outros: _____

APÊNDICE B — MODELO DE BOLETIM OPERACIONAL | NÍVEL AMARELO (ATENÇÃO)

Sistema de Alerta Operacional e Suporte à Decisão para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru – SISAL-Itapecuru

Emissão	CAEMA – Operação/ETA	Ciência técnica	SEMA – Monitoramento e Gestão
Data de emissão	___ / ___ / ___	Período avaliado	___ / ___ / ___ a ___ / ___ / ___
Trecho/Ponto(s)	_____ _____	Município	_____

NÍVEL AMARELO – ATENÇÃO

A condição observada indica elevação do risco de intensificação da salinização, exigindo reforço da vigilância e acompanhamento mais frequente.

Indicadores de monitoramento

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Condutividade elétrica	___	$\mu\text{S cm}^{-1}$	___ / ___ às ___	() campo () laboratório
STD	___	mg L^{-1}	___ / ___ às ___	
Material em suspensão	___	mg L^{-1}	___ / ___ às ___	
Turbidez	___	NTU	___ / ___ às ___	
pH	___	—	___ / ___ às ___	
Temperatura da água	___	$^{\circ}\text{C}$	___ / ___ às ___	

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Oxigênio dissolvido	_____	mg L ⁻¹	____ / ____ às _____	
Temperatura do ar	_____	°C	____ / ____ às _____	
Vazão (quando disponível)	_____	m ³ s ⁻¹	____ / ____ às _____	
Pluviosidade acumulada	_____	mm	período: _____	
MEI / ENSO	_____	—	período: _____	

• Identificação

Emissão: CAEMA - Operação/ETA | Ciência técnica: SEMA - Monitoramento e Gestão

Data de emissão: ____ / ____ / ____

Período avaliado: ____ / ____ / ____ a ____ / ____ / ____

Trecho/Ponto(s): _____ | **Município:**

Responsável técnico: _____ | **Contato:**

Situação da confirmação: () primeira ocorrência () confirmado por segunda medição

Data da confirmação: ____ / ____ / ____

• Interpretação operacional

A condição observada indica elevação do risco de intensificação da salinização, exigindo reforço da vigilância e acompanhamento mais frequente. O evento ainda não configura situação crítica, mas requer confirmação e avaliação de tendência na janela operacional seguinte.

Síntese técnica do contexto hidroclimático:

Elementos de apoio à interpretação: () persistência () coerência com STD ()
baixa precipitação () baixa vazão () influência sazonal

- **Projeção de curto prazo**

Modelo utilizado: () Random Forest () XGBoost () outro: _____

Janela operacional analisada: () quinzenal () mensal

Condutividade elétrica prevista: _____ $\mu\text{S cm}^{-1}$

Tendência prevista: () aumento () estabilidade () redução

Variáveis de maior influência na previsão: 1. _____ 2. _____ 3.

- **Recomendações**

- Repetir a medição no intervalo mais curto viável dentro da rotina operacional.
- Intensificar temporariamente a frequência de monitoramento.
- Executar o modelo preditivo para a janela operacional definida.
- Preparar o plano de contingência para eventual escalonamento ao Nível Vermelho.

- **Programação da próxima atualização**

Fonte: Elaboração própria, com base na proposta do SISAL-Itapecuru e na série histórica de referência (1992–2024).

Medição de confirmação prevista: ____ / ____ / ____

Próximo boletim operacional: ____ / ____ / ____

Anexos: () gráfico de tendência () laudo laboratorial () tabela de limiares

() outros: _____

APÊNDICE C — MODELO DE BOLETIM OPERACIONAL | NÍVEL VERMELHO (CRÍTICO)

Sistema de Alerta Operacional e Suporte à Decisão para Intrusão Salina no Setor Inferior do Rio Itapecuru – SISAL-Itapecuru

Emissão	CAEMA – Operação/ETA	Ciência técnica	SEMA – Monitoramento e Gestão
Data de emissão	___ / ___ / ____	Período avaliado	___ / ___ / ____ a ___ / ___ / ____
Trecho/Ponto(s)	_____	Município	_____

NÍVEL VERMELHO – CRÍTICO

A condição observada indica risco crítico de salinização/intrusão salina, com potencial comprometimento da qualidade da água e possíveis repercussões sobre a captação e o tratamento.

Indicadores de monitoramento

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Condutividade elétrica	_____	$\mu\text{S cm}^{-1}$	___ / ___ às _____	acima do limiar crítico
STD	_____	mg L^{-1}	___ / ___ às _____	coerência: () sim () não
Material em suspensão	_____	mg L^{-1}	___ / ___ às _____	
Turbidez	_____	NTU	___ / ___ às _____	risco operacional adicional
pH	_____	—	___ / ___ às _____	
Temperatura da água	_____	$^{\circ}\text{C}$	___ / ___ às _____	
Oxigênio dissolvido	_____	mg L^{-1}	___ / ___ às _____	

Indicador	Valor	Unidade	Data/Hora	Observação
Vazão (quando disponível)	_____	m ³ s ⁻¹	____ / ____ às _____	
Pluviosidade acumulada	_____	mm	período: _____	
MEI / ENSO	_____	—	período: _____	

Interpretação operacional

A condição observada indica risco crítico de salinização/intrusão salina, com potencial comprometimento da qualidade da água no ponto ou trecho monitorado e possíveis repercussões sobre a captação e o tratamento.

Síntese do contexto hidroclimático e operacional:

Observações técnicas adicionais:

Projeção de persistência do evento

Modelo utilizado: () Random Forest () XGBoost () outro: _____

Janela operacional analisada: () quinzenal () mensal

Condutividade elétrica prevista / persistência estimada:

Variáveis de maior influência na previsão: 1. _____ 2. _____ 3.

• Recomendações

- Acionar imediatamente o plano de contingência.
- Intensificar a rotina operacional de monitoramento para a maior frequência viável.
- Reavaliar as condições de captação e registrar todas as decisões adotadas.
- Emitir boletim operacional crítico e ampliar a comunicação institucional.

Fonte: Elaboração própria, com base na proposta do SISAL-Itapecuru e na série histórica de referência (1992–2024).

- **Registro da decisão**

Decisão operacional adotada:

Responsável pela decisão - CAEMA: _____

Ciência técnica - SEMA: _____

- **Programação da próxima atualização**

Próxima medição: _____ / _____ / _____

Próximo boletim operacional: _____ / _____ / _____

Critério para retorno de nível: () redução sustentada abaixo do limiar crítico ()
confirmação por _____ **medições consecutivas**

Anexos: () série temporal () laudos laboratoriais () registros operacionais ()
tabela de limiares

Fonte: elaboração própria, com base na proposta do SISAL-Itapecuru e na série histórica de referência (1992-2024).